

**DESARROLLO DE UN AGREGADO LIGERO PARA
CONCRETO LIVIANO A PARTIR DE MEZCLAS DE PET
POS CONSUMO Y UN ÁRIDO PÉTREO**

**SARA GONZÁLEZ ALZATE
PAOLA ANDREA RAMÍREZ GIRALDO**

**Trabajo de grado para optar al título de
Ingeniera civil**

**José William Restrepo Montoya
Docente-Investigador
Área de Materiales y Procesos de Manufactura**



**UNIVERSIDAD EIA
INGENIERÍA CIVIL
ENVIGADO
2019**

Este trabajo de grado va dedicado a nuestros padres, Alexis, Sandra, Abelardo y Nubia. Sin ustedes esto no hubiera sido posible.

A nuestros hermanos, Salomé y Leandro por su apoyo incondicional y amor.

AGRADECIMIENTOS

En estas líneas queremos agradecer a todas las personas que hicieron posible la realización de este trabajo de grado y la culminación de nuestra carrera profesional. Estas palabras son para ustedes.

A Dios, quien como principal guía de nuestro camino nos bendice y da fuerzas a diario para continuar llevando a cabo cada meta trazada.

A nuestros padres por su amor, comprensión y apoyo. Por siempre ayudarnos a encontrar la mejor forma de afrontar los problemas para crecer tanto personal como profesionalmente. Gracias a ustedes nuestro caminar por la vida es mejor.

A nuestros hermanos por su apoyo incondicional, por ser fuente de felicidad y orgullo. Gracias por ser amigos para la vida y nuestros futuros colegas.

A nuestra familia y amigos, quienes nos han visto crecer y de quienes hemos recibido un apoyo incondicional y palabras de aliento. Gracias por todos los momentos de alegría, por su preocupación constante y por la confianza puesta en nosotros.

Agradecemos a nuestro director de tesis, José William Restrepo Montoya, quien con su experiencia, conocimiento y motivación nos orientó en el desarrollo de este trabajo y a los todos docentes que con su sabiduría, conocimiento y apoyo, nos ayudaron en nuestro paso por Universidad EIA.

CONTENIDO

pág.

1. PRELIMINARES	11
1.1 Planteamiento del problema	11
1.2 Justificación	12
1.3 Objetivos del proyecto.....	12
1.3.1 Objetivo General	12
1.3.2 Objetivos Específicos.....	13
1.4 Marco de referencia	13
1.4.1 Antecedentes	13
1.4.2 Marco Metodológico.....	15
2. METODOLOGÍA	29
2.1 Diseño de protocolo para fabricación del agregado aligerado.....	29
2.1.1 Recolección y compra de materia prima	29
2.1.2 Caracterización de materias primas	30
2.1.3 Fabricación del agregado sintético del composite PET-Arena	33
2.2 Evaluación de la resistencia al desgaste específica del agregado.....	36
2.2.1 Preparación de la muestra.....	36
2.2.2 Ensayo de resistencia al desgaste	37
2.2.3 Selección del mejor tratamiento	37
2.3 Evaluación del comportamiento mecánico de las mezclas de concreto con reemplazos	37
2.3.1 Diseño de mezclas de concreto.....	37
2.3.2 Ensayo de manejabilidad de las mezclas	41
2.3.3 Conformación de cilindros de prueba.....	42
2.3.4 Determinación de la variación en el peso de mezclas de concreto.....	43
2.3.5 Ensayo de resistencia a la compresión	43
2.4 Presentación de resultados obtenidos.....	43
2.4.1 Recolección y organización de datos	43
2.4.2 Análisis estadístico.....	43
3. PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	45
3.1 Protocolo de producción del agregado sintético aligerado.....	45
protocolo de producción del agregado sintético aligerado	45
3.2 Resistencia al desgaste específica del agregado	47
3.3 Determinación del asentamiento de mezclas en estado fresco	48
3.4 Variación de la densidad de mezclas de concreto	48
3.5 Resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos	49
4. CONCLUSIONES Y CONSIDERACIONES FINALES	53
4.1 Consideraciones finales	53
REFERENCIAS.....	55

LISTA DE TABLAS

Tabla 1: Carga abrasiva según la gradación. Tomado para uso académico de (ICONTEC, 1995)	17
Tabla 2: Gradaciones de muestras de ensayo. Tomado para uso académico (ICONTEC, 1995).	18
Tabla 3: Edad de ensayo de los especímenes. Tomado para uso académico de (ICONTEC, 2010).	24
Tabla 4: Valores de t. Tomado para uso académico de (Rivera, 2016).	26
Tabla 5: Valores de coeficientes de variación y grado de uniformidad que puede esperarse en el concreto, bajo diferentes condiciones de producción. Tomado para uso académico de (Rivera, 2016).	27
Tabla 6: Clasificación de asentamiento. Tomado para uso académico de (Cerón, 2013).	28
Tabla 7: Granulometría del árido pétreo.....	31
Tabla 8: Clasificación del agregado fino de acuerdo a su módulo de finura	31
Tabla 9: Temperaturas de operación	33
Tabla 10: Granulometría del agregado grueso	37
Tabla 11: Granulometría del agregado fino.....	38
Tabla 12: Componentes de la mezcla de concreto según tipo de muestra.....	39
Tabla 13: Dosificaciones de mezcla	40
Tabla 14: Fabricación del agregado sintético aligerado	45

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Esquema del proceso de extrusión y peletizado. Tomado para uso académico de (Plycem, 2015).....	16
Figura 2: Máquina de los Ángeles, medidas en mm - Tomado para uso académico de (ICONTEC, 1995).....	18
Figura 3: Ensayo de asentamiento con el cono de Abrams. Tomado para uso académico de (Rivera, 2016).	23
Figura 4: Esquema de los modelos de fractura típicos. Tomado para uso académico de (ICONTEC, 2010).....	25
Figura 5: Curva de distribución normal. Tomado para uso académico de (Rivera, 2016, pág. 121)	26
Figura 6: A menor valor S y V, menor dispersión. Los menores valores de S y V dan una curva que representa mejor uniformidad (calidad). Tomado para uso académico de (Rivera, 2016).	27
Figura 7: Esquema de la metodología. Realizado por el grupo.....	29
Figura 8: Imágenes tomadas de la recolección y picado manual de botellas posconsumo de PET (a), tratamiento mecánico en molino pulverizador de las hojuelas de PET (b) y PET peletizado (c).....	30
Figura 9: Curva Granulométrica de la Arena.....	32
Figura 10: Imágenes de extrusora en laboratorio de materiales (a), salida de material extruido (b) y resultado de la extrusión de PET.	34
Figura 11: Imágenes de la extrusora vertical con empuje manual (a) y PET escapando por las zonas de poco ajuste del cilindro (b).	34
Figura 12: Taponamientos en la extrusora vertical	35
Figura 13: Imágenes de la mezcla de PET-Arena asistida con pistola de calor (a) y agregados sintéticos obtenidos (b).....	35
Figura 14: Imágenes del calentamiento del composite PET-Arena a partir de soplete (a) y picado del material solidificado (b).	36
Figura 15: Curva Granulométrica de la Grava	38
Figura 16: Curva Granulométrica del agregado fino	39
Figura 17: Ensayo de manejabilidad tomado para una mezcla en estado fresco utilizando el cono de Abrams, la varilla compactadora y un flexómetro para estimar el asentamiento.	42
Figura 18: Imágenes de la conformación de los especímenes cilíndricos (a), fraguado de las mezclas durante 24 horas (b) y desencofrado de los cilindros utilizando aire comprimido (c).	42
Figura 19: Código de identificación de los especímenes para ensayo	42
Figura 20: Pesaje de los especímenes cilíndricos	43
Figura 21: Agregado sintético aligerado elaborado a partir de la combinación PET-Arena.	47
Figura 22: Agregado 60/40 antes (a) y después (b) de la prueba de resistencia al desgaste. Agregado 50/50 antes (c) y después (d) de la prueba de resistencia al desgaste.	47
Figura 23: Mezclas de concreto en estado fresco estimando a partir del cono de Abrams, la varilla compactadora y un flexómetro su asentamiento.	48
Figura 24: Comparación de la densidad de los cilindros secos y húmedos.....	49

Figura 25: Variación de la resistencia a la compresión a 7 (a), 14 (b) y 28 (c) días de curado.
..... 50

Figura 26: Variación de la resistencia a la compresión vs los días de curado de las diferentes
mezclas 51

Figura 27: Comparación de la disminución de la densidad (kg/m^3) Vs la resistencia a la
compresión en MPa a 28 días de curado..... 52

LISTA DE ANEXOS

Anexo 1: Comprobante de entrega de las muestras para el ensayo de resistencia a la abrasión.....	60
Anexo 2: Resultado de ensayo de resistencia al desgaste para agregado con reemplazo de 60%-40% PET/arena	61
Anexo 3: Resultado de ensayo de resistencia al desgaste para agregado con reemplazo de 50%-50% PET/arena	62
Anexo 4: Resultado del peso de los especímenes cilíndricos en estado húmedo y seco .	63
Anexo 5: Resistencia a la compresión a los 7 días de curado	64
Anexo 6: Resistencia a la compresión a los 14 días de curado	64
Anexo 7: Resistencia a la compresión a los 28 días de curado	64
Anexo 8: Muestras 1 y 2 falladas a los 7 días de curado	65
Anexo 9: Muestras 3 y 4 falladas a los 7 días de curado	66
Anexo 10: Muestra 5 fallada a los 7 días de curado	66
Anexo 11: Muestras 1 y 2 falladas a los 14 días de curado	67
Anexo 12: Muestras 3 y 4 falladas a los 14 días de curado	68
Anexo 13: Muestra 5 fallada a los 14 días de curado	68
Anexo 14: Muestras 1 y 2 falladas a los 28 días de curado	69
Anexo 15: Muestras 3 y 4 falladas a los 28 días de curado	70
Anexo 16: Muestra 5 fallada a los 28 días de curado	70

RESUMEN

En el sector de la construcción, los concretos livianos permiten reducciones en el peso de las estructuras debido a la inclusión de agregados ligeros, entre los que se incluyen los polímeros. Materiales ampliamente estudiados pero poco utilizados debido al bajo desempeño de la resistencia compresión del concreto; hecho que se relaciona principalmente a que su superficie lisa e hidrofóbica no genera anclajes con los demás materiales dentro de la mezcla.

En este trabajo de grado se describe el desarrollo de un agregado ligero sintético con una superficie porosa y rugosa, conformado por una matriz polimérica termoplástica (PET reciclado) y un refuerzo cerámico (Arena). Se presenta el método de fabricación de los agregados sintéticos; seleccionando por medio de ensayos en la máquina de los Ángeles aquel cuya relación PET/Arena mostró la mayor resistencia al desgaste. Se analiza el comportamiento, en manejabilidad, resistencia a la compresión y densidad, de mezclas de concreto liviano en las cuales el agregado pétreo natural fue sustituido parcialmente por el agregado sintético PET/Arena en proporciones de 15%, 30%, 45% y 60% en volumen.

Se encuentra que con la mayor sustitución del agregado pétreo por agregado PET/Arena, es decir 60%, la disminución de la resistencia a la compresión no sobrepasa 40%. En el caso de la densidad, ésta se reduce en 11.4% que equivale a 299.21 kg/m^3 . Lo cual supone un resultado valioso y muy promisorio para ser utilizado en concretos aligerados.

Palabras claves: Concreto liviano, PET reciclado, agregado sintético, resistencia a la compresión, densidad.

ABSTRACT

In the construction sector, lightweight concrete provides a reductions in the weight of the structure due to the inclusion of lightweight aggregates, including polymers. Materials widely studied but little used due to the low performance of the compressive strength of concrete; this fact is mainly related to the occurrence that its smooth and hydrophobic surface does not generate anchors with the other materials within the mixture.

This grade work describes the development of a synthetic light aggregate with a rough and porous surface, consisting of a thermoplastic polymer matrix (recycled PET) and a ceramic reinforcement (Arena). The method of manufacturing synthetic aggregates is presented; selecting by trials in the Los Angeles machine that whose PET / Arena ratio showed the highest wear resistance. The behavior, in workability, compressive strength and density, of light concrete mixtures in which the natural stone aggregate was partially replaced by the synthetic PET / Arena aggregate in proportions of 15%, 30%, 45% and 60 is analyzed % by volume

It was found that with the greater replacement of the stone aggregate by PET-Arena aggregate, that is 60%, the decrease in compressive strength does not exceed 40%. In the case of density, this is reduced by 11.4%, which is equivalent to 299.21 kg/m^3 . Which is a valuable and very promising result to be used in lightweight concrete.

Keywords: Lightweight concrete, recycled PET, synthetic aggregate, compressive strength, density.

1. PRELIMINARES

1.1 Planteamiento del problema

En el campo de la construcción, el peso propio de los elementos que constituyen una estructura es determinante a la hora de estimar las cargas de diseño, es por esto que reducir su densidad representa beneficios, como disminución en la cantidad del acero de refuerzo y de los demás materiales dentro de la mezcla de concreto (Contreras, 2016), bajo este principio se desarrolló el concreto liviano que es una mezcla con adiciones o reemplazos de materiales aligerantes, siendo ideal en la construcción de elementos secundarios en edificios o viviendas, como losas aligeradas y muros divisorios (National Ready Mixed Concrete Association, 2008).

Uno de los materiales aligerantes ampliamente estudiado para ser utilizado dentro de las mezclas de concreto son las resinas poliméricas. Hallazgos en estudios indican que estos materiales pueden usarse como reemplazo parcial del agregado pétreo natural, fundamentalmente por el cambio en el comportamiento de falla siendo más dúctil que en el concreto convencional, es decir, puede soportar las grietas generadas durante la falla mecánica del concreto (Saikia & de Brito, 2012). Además de que el concreto que contiene partículas de PET como un agregado, tiene una mejor resistencia contra el ataque de ácido sulfúrico en estructuras industriales y tuberías de desagüe (Sharma & Bansal, 2016).

A pesar de sus beneficios, los concretos adicionados con polímeros no son altamente demandados en la industria de la construcción liviana debido a que exhiben menores resistencias a la compresión que aquellos con agregado pétreo. Según una investigación realizada por (García Cabrera, 2007) se concluyó que en una mezcla de concreto con reemplazos mayores al 20 % de agregados pétreos por polímero, sin ninguna alteración en su superficie, se podría reducir hasta el 72 % de su resistencia a la compresión debido a la baja adherencia e interacción que tienen los polímeros con la pasta cementante. Sin embargo, investigaciones sugieren que la modificación de la superficie de los agregados poliméricos para incrementar su rugosidad puede producir concretos con niveles aceptables de resistencia (Ferreira, de Brito, & Saikia, 2012). En pastas cementantes preparadas con soluciones de hipoclorito, hidróxido de sodio y escoria granulada de alto horno (GGBS) se halló que los iones de hidrógeno, hidróxido y oxígeno se pueden unir con el calcio, presente en la matriz de cemento, mostrando que con la modificación superficial de agregados poliméricos se produjo un aumento de hasta 33 % en la resistencia comparado con el preparado con polímeros sin ningún tratamiento (Yun-Wang, Dae-Joong, Jee-Seung, & Sun-Kyu, 2005).

En este sentido, la mejora de las propiedades del concreto liviano debido a la adición de residuos poliméricos puede tener inmensas implicaciones prácticas. Sin embargo, según Saikia & de Brito no se tienen registros de propuestas para el aumento en la adherencia del polímero y la pasta de cemento utilizando agregados naturales. Por ello, con el fin de crear una interfaz entre los materiales del concreto y la resina polimérica, este trabajo de grado presenta el desarrollo y la caracterización de un agregado sintético constituido como un composite de PET reciclado y arena fina. Se exponen los procesos de fabricación ensayados y adoptados para que el agregado desarrollado tenga una rugosidad superficial y porosidad que promuevan una adherencia con la pasta cementante. En este informe,

también se analiza el efecto de la sustitución parcial del agregado pétreo natural con el agregado desarrollado sobre la resistencia a la compresión, manejabilidad y peso dentro de mezclas de concreto liviano en base a recomendaciones de las normas NTC 396 y NTC 673.

1.2 Justificación

La implementación de concretos aligerados para estructuras livianas presenta beneficios como la reducción en su peso, mejora las propiedades termo acústicas y el rendimiento en el tiempo de ejecución de acabados, adicionalmente disminuye la transmisión de vibraciones (Concretos Argos S.A, 2010).

Una las características de estos concretos es su comportamiento ante un evento sísmico. Las estructuras con construcción liviana pueden llegar a pesar hasta 75 % menos que un sistema tradicional, brindando seguridad a los usuarios y disminuyendo tiempos de ejecución en la construcción, características probadas por décadas en países de gran bagaje y con una trayectoria constructiva de primer nivel como el caso de Estados Unidos, Nueva Zelanda y Japón (Plycem, 2015). Alfonso Estrada, Gerente de Desarrollo Técnico de (Plycem, 2015) afirma que “Un sistema que es rígido y fuerte puede romperse o dañarse más rápido ante un movimiento telúrico, pero por el contrario un sistema liviano evidentemente se mueve más”.

El uso de resinas poliméricas dentro del concreto liviano se ha convertido en una alternativa atractiva para obtener beneficios en las propiedades físicas y mecánicas; así mismo en una nueva forma de darle manejo al creciente volumen de desechos sólidos (Siddique, Khatib, & Kaur, 2008) que apunta hacia el concepto de sostenibilidad con productos y procesos para la recuperación de materiales. Según ENKA en Colombia se producen 127.000 toneladas de PET al año de las que se recicla entre el 25 % y 30 % en la producción de nuevos envases y en la industria textil (Arias Jiménez, 2015). No obstante, la inclusión del PET dentro de la mezcla de concreto no es común, debido a que durante la preparación del concreto con polímero hay formación de interfaces separadas entre el polímero y la pasta de cemento.

Es así como desde el punto de vista técnico, se justifica el desarrollo de nuevos agregados poliméricos ligeros compatibles con la pasta cementante; que conlleve al aumento de propiedades físicas y mecánicas del concreto, siendo la resistencia a la compresión una de las más beneficiadas y dentro del marco de la economía circular (Siddique, Khatib, & Kaur, 2008).

1.3 Objetivos del proyecto

1.3.1 Objetivo General

Evaluar las propiedades físico-mecánicas de mezclas de concreto liviano con sustituciones parciales del agregado grueso natural por 15 %, 30 %, 45 % y 60 % en volumen de gránulos de compuesto de PET pos consumo y arena.

1.3.2 Objetivos Específicos

Diseñar un protocolo para la fabricación de gránulos livianos a partir de procesos térmicos de mezclas de PET/arena en relaciones de 40-60% y 50-50%.

Determinar la variación de resistencia al desgaste específica de los agregados obtenidos con diferentes relaciones de PET/arena mediante ensayos físicos de laboratorio normalizados.

Evaluar el comportamiento mecánico a través de la prueba de resistencia a la compresión y el comportamiento físico mediante el ensayo de manejabilidad y medición de la densidad de las mezclas de concreto sustituyendo parcialmente el agregado pétreo por gránulos de PET/arena en proporciones de 15 %, 30 %, 45 % y 60 %.

1.4 Marco de referencia

1.4.1 Antecedentes

El concreto es uno de los materiales más utilizados para la construcción en el mundo. Es una mezcla de dos componentes: agregados y pasta (Universidad Autónoma de Chihuahua, 2012). Los agregados pueden ser finos o gruesos según su granulometría y se definen como materiales inertes que poseen una resistencia propia, actuando principalmente como material de relleno y proporcionando parte de la resistencia a la compresión del concreto. El tipo de agregado que le sea incorporado, determina la clasificación y uso (Vega, 2013).

Para los concretos estructurales la resistencia a la compresión varía entre 17 MPa y 35 MPa¹, mientras que en los concretos no estructurales que son aquellos que separan los espacios y no soportan las cargas arquitectónicas, la resistencia está entre 7 MPa y 17 MPa. Este tipo de concretos pueden ser diseñados a partir de materiales convencionales con un componente aligerante como polímeros, arcillas y pizarras piro expandidas (National Ready Mixed Concrete Association, 2008).

El concreto liviano se define en el documento ACI 213R (1987) como aquel con una densidad en estado seco al aire menor a 1.850 kg/m³. Se obtienen principalmente con el reemplazo de manera parcial (fracción gruesa) o total del árido pétreo (Videla & López, 2000). Este material ha encontrado amplia aplicación en muchos tipos de estructuras como casas, apartamentos, escuelas y edificios de oficina donde las solicitaciones de resistencia no son elevadas. Entre los beneficios principales que se derivan de las propiedades del concreto liviano pueden mencionarse el alto poder aislante, térmico y acústico que posee, la factibilidad de manejo como resultado de su peso reducido, la simplificación en la

¹ Mega Pascales: Esfuerzo máximo que puede soportar un material bajo una carga de aplastamiento.

cimentación de estructuras cuya carga muerta total se disminuye reduciendo así el costo de las obras (Generalidades sobre el concreto ligero, 2007).

La inclusión de polímeros como reemplazo o adición en diferentes materiales utilizados en la construcción es un tema que ha tomado fuerza en años recientes. En el Centro Experimental de Vivienda Económica (CEVE) de Argentina se han fabricado ladrillos con distintos materiales de desechos, entre los que se encuentran: papel, PET y cáscaras de maní, con reducciones en su peso. Un ladrillo común pesa 2,5 kilos, el de papel 1,1 kilo, el de PET un kilo y el de cáscara de maní medio kilo (Carrillo, González, & Aperador, 2013). En la fabricación de concreto, se ha realizado un gran trabajo sobre el uso de desechos plásticos con polímeros como el tereftalato de polietileno (PET), policloruro de vinilo (PVC), polietileno de alta densidad (HDPE), plásticos termoendurecibles, mezclas de desechos plásticos triturados y reciclados, espumas de poliestireno expandido (EPS), plásticos reforzados con vidrio (GRP), policarbonato, espumas de poliuretano y fibras de polipropileno. Estos trabajos se centran principalmente en las propiedades mecánicas, y en la mejora del comportamiento de permeabilidad del concreto por la incorporación de varios tipos de agregados plásticos (Ramírez-Arreola, y otros, 2005).

En investigaciones publicadas en la revista "Construction and Building Materials" en un artículo de (Saikia & de Brito, 2012) se estudiaron los efectos de las adiciones de PET en las mezclas de concreto. Se plantearon diferentes dosificaciones con reemplazos de 15 %, 30 %, 45 %, 60 % y 75 % y se observó que cuando se sustituían los áridos por PET en dosificaciones menores a 50 %, las resistencias a compresión y flexo tracción presentan valores aceptables según las normas técnicas, y que estos concretos pueden tener éxito en la construcción.

Una revisión realizada por (Gu & Ozbakkaloglu, 2016) de 84 investigaciones, resalta que los agregados de polímeros pos consumo pueden sustituir exitosa y efectivamente a los agregados pétreos convencionales. Además, indica entre sus hallazgos más relevantes que la incorporación de polímeros reciclados en el concreto reduce la densidad aparente de éste. En comparación con el concreto convencional, la densidad disminuye entre 2,5-13 % en un concreto que contiene agregados de polímero en cantidades del 10 % al 50 %. En un concreto con reemplazos hasta del 50 % de agregados de polímero reciclado, la resistencia a la compresión oscilo entre 48 y 19 MPa.

(Al-Manaseer & Dalal, 1997) encontraron que la sustitución parcial de agregado grueso por PET causa una reducción en la resistencia a la compresión debido a la pobre adherencia entre la pasta de cemento y las superficies de agregado de PET; lo cual limita dicha sustitución a reemplazos no superiores al 50 %. Además, en este artículo se muestra que en la superficie fracturada del cilindro de concreto la mayoría de los agregados de polímero se separaron en lugar de adherirse.

Por lo anterior, en el desarrollo de esta investigación se propusieron reemplazos del 15 %, 30 %, 45 % y 60 %, con el fin de tener una muestra amplia para su análisis.

Una de las razones para la inclusión del PET en la industria de la construcción son sus propiedades como resistencia térmica, química, y al impacto; asimismo se puede procesar por métodos como inyección y extrusión siendo 100% reciclable (Grupo SEDA, 2010). Es uno de los polímeros más producido y comercializado en el mundo, por lo cual también es

uno de los más grandes generadores de contaminación debido a su inadecuada disposición final.

Actualmente los procesos de reciclaje de polímeros son cruciales para hacer frente al creciente volumen de este tipo de residuos. Un grupo de investigadores mexicanos desarrolló el proyecto SANDPLAST, financiado por el programa EUREKA, que consiste en una tecnología para producir materiales de construcción de concreto usando residuos poliméricos y rellenos inertes (Muñoz, Ossa, Romo, & Botero, 2014). En Colombia, las propuestas que involucran el PET dentro del concreto concluyen que no es eficiente trabajar con este tipo de material como agregado en el diseño de mezclas debido a sus caídas en la resistencia a la compresión (Quintero Blandón & Mahecha Rico, 2016).

Dentro de las propiedades mecánicas más comunes en un concreto está la resistencia a la compresión, y para el caso de las propiedades físicas se cuenta con la manejabilidad y densidad. En Colombia, para medir estas propiedades se siguen recomendaciones de las Normas Técnicas Colombianas (NTC) que son traducciones adaptadas de las ASTM (American Society for Testing and Materials) creadas por el ICONTEC, que establecen las directrices, reglas y características de un proceso o producto permitiendo alcanzar la calidad (Trillos, 2013).

1.4.2 Marco Metodológico

- **Diseño de un protocolo para generar rugosidad superficial en el nuevo agregado aligerado**

Un protocolo es una secuencia detallada de un proceso de actuación científica, técnica o médica (Real Academia Española, 2017). Se utiliza generalmente en el ámbito científico para describir el conjunto de pasos para replicar un proceso específico.

La generación de rugosidades en la superficie de los materiales, comprende dos procesos básicos, uno de ellos físico que se realiza con máquinas-herramientas o partículas abrasivas que modifican su geometría y textura superficial; y el otro químico en el que con un tratamiento con reactivos, comúnmente ácidos, lejías o solventes orgánicos, se modifican la textura superficial.

Durante el desarrollo de esta investigación, se tiene como objetivo fabricar gránulos a partir de la combinación PET/arena conocidos comúnmente como pellets, para ellos se implementan técnicas como la extrusión que tienen como finalidad obtener objetos y piezas de formas predeterminadas y estables permitiendo la combinación de uno o más materiales, logrando modificar así su geometría y textura.

En la extrusión el material plastificado fluye por una boquilla que lo conforma y el enfriamiento se efectúa a la salida del mismo cuando el molde entra en contacto con aire, agua o una superficie fría. La función de la máquina de extrusión, es fundir y mezclar la alimentación (pellets) y bombearla o empujarla hacia fuera a través de una boquilla (Muñoz D. , 2005).

La extrusión, por su versatilidad y amplia aplicación, suele dividirse en varios tipos, dependiendo de la forma del dado y del producto eximido (Ojeda, 2011).

Así la extrusión puede ser:

- De tubo y perfil
- De película tubular
- Para peletización y fabricación de compuestos

Siendo el último procedimiento mencionado, el de nuestro interés, los pasos para llevarlo a cabo son los siguientes:

Separación: Los métodos de separación pueden ser clasificados en separación macro, micro y molecular. La macro separación se hace sobre el producto completo usando el reconocimiento óptico del color o la forma. La micro separación puede hacerse por una propiedad física específica: tamaño, peso, densidad, etc.

Granulado: Por medio de un proceso industrial, el polímero se muele y convierte en gránulos parecidos a las hojuelas del cereal.

Limpieza: Ya que los polímeros granulados están generalmente contaminados con comida, papel, piedras, polvo y pegamento, estos deben limpiarse primero.

Peletizado: Para esto, el plástico granulado debe fundirse y pasarse a través de la extrusora para tomar la forma de spaghetti al enfriarse en un baño de agua. Una vez frío es fragmentado en trozos llamados pellets.

En la Figura 1 se muestra el esquema del proceso de peletizado.

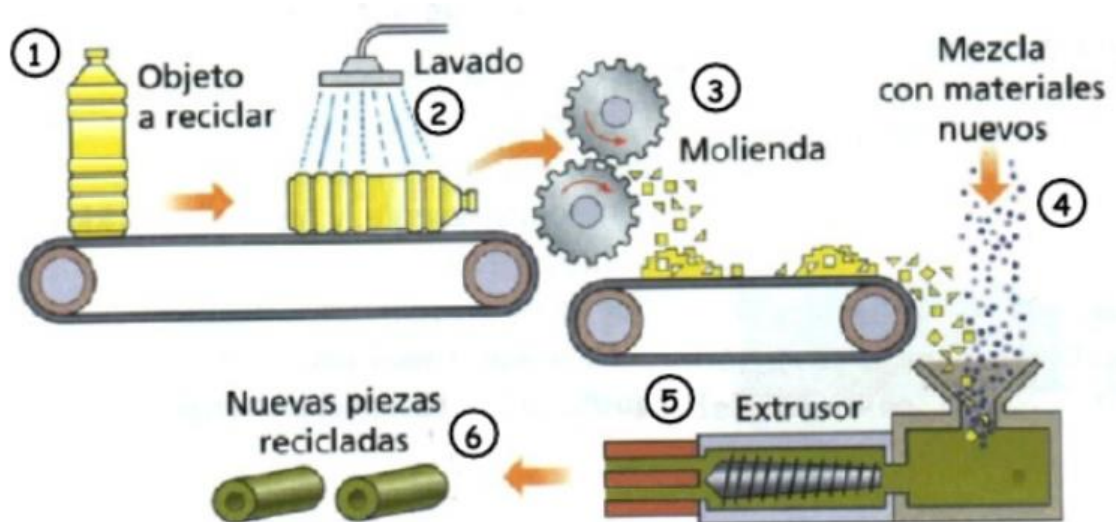


Figura 1: Esquema del proceso de extrusión y peletizado. Tomado para uso académico de (Plycem, 2015).

○ **Variación de resistencia al desgaste específica del agregado**

La resistencia a la abrasión, desgaste, o dureza de un agregado, es una propiedad que depende principalmente de las características de la roca madre. Este factor cobra importancia cuando las partículas van a estar sometidas a un roce continuo como es el caso de pisos y pavimentos, para lo cual los agregados que se utilizan deben estar duros. Para evaluar la resistencia del agregado a los procesos abrasivos, se le aplican como métodos de calificación la prueba de abrasión y la prueba de resistencia al impacto; este tipo de determinaciones puede proporcionar un índice del comportamiento futuro del agregado en el concreto.

La resistencia a la abrasión y al impacto de los agregados se determina mediante la prueba con la máquina de los Ángeles, en su variante estadounidense, y la máquina de impacto, en su variante inglesa. Los resultados de estas pruebas son indicadores de la calidad física del agregado (Uribe, Álvarez , & Flores, 2001).

En Colombia para determinar la dureza, se utiliza un método indirecto cuyo procedimiento se encuentra descrito en las normas NTC 98 para los áridos y norma NTC 93 para los agregados gruesos, en ambos métodos se utiliza la máquina de los Ángeles, que es un aparato constituido por un tambor cilíndrico hueco de acero de 500 mm de longitud y 700 mm de diámetro aproximadamente, con un eje horizontal fijado a un dispositivo exterior que puede transmitirle un movimiento de rotación alrededor del eje. El tambor tiene una abertura para la introducción del material de ensayo y de la carga abrasiva, que son esferas de fundición o de acero de unos 48 mm de diámetro y entre 390 y 445 g de masa (Rocha, 2013), cuya cantidad depende del material que se ensaya pero varía entre 6 y 12 unidades como se lista en la Tabla 1.

Tabla 1: Carga abrasiva según la gradación. Tomado para uso académico de (ICONTEC, 1995)

Gradación	Número de esferas	Masa de la carga. g
A	12	5 000 ± 25
B	11	4 584 ± 25
C	8	3 330 ± 20
D	6	2 500 ± 15

Las muestras a ensayar deben estar limpias y lavadas y cumplir con una de las siete granulometrías indicadas por la norma NTC 77 que puede consultarse en la Tabla 2.

Tabla 2: Gradaciones de muestras de ensayo. Tomado para uso académico (ICONTEC, 1995).

Tamaño del tamiz, mm (abertura cuadrada)		Masa de los tamaños indicados, g			
Pasa	Retenido en	Granulometría			
		A	B	C	D
37,5	25,0	1 250 ± 25	-	-	-
25,0	19,0	1 250 ± 25	-	-	-
19,0	12,5	1 250 ± 10	2 500 ± 10	-	-
12,5	9,5	1 250 ± 10	2 500 ± 10	-	-
9,5	6,3	-	-	2 500 ± 10	-
6,3	4,75	-	-	2 500 ± 10	-
4,75	2,36	-	-	-	5 000 ± 10
Total		5 000 ± 10	5 000 ± 10	5 000 ± 10	5 000 ± 10

Con la muestra y la carga abrasiva en el interior del tambor, se hace girar entre 30 y 33 rpm hasta alcanzar 500 vueltas. Después se descarga el material de la máquina y se hace una separación preliminar de la muestra en un tamiz mayor de 1,70 mm y se tamiza la porción fina en un tamiz de 1,70 mm según lo establece la NTC 77. Se lava el material más grueso que el tamiz 1,70 mm se seca en el horno a una temperatura entre 105°C y 110°C hasta obtener una masa constante y se pesa con una aproximación de 1 g.

La Figura 2 muestra las partes y medidas de la máquina de los Ángeles según lo descrito por la norma NTC 98.

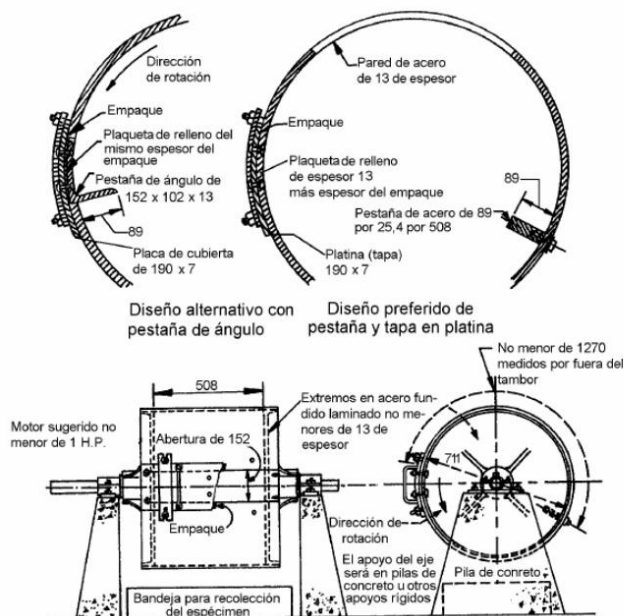


Figura 2: Máquina de los Ángeles, medidas en mm - Tomado para uso académico de (ICONTEC, 1995)

El choque entre el agregado y las bolas da por resultado la abrasión y los efectos se miden como la diferencia entre la masa inicial de la muestra seca y la masa del material desgastado expresándolo como porcentaje inicial. A este valor numérico se le denomina coeficiente de desgaste o porcentaje de pérdida de Los Ángeles y no debe superar el 40 % para asegurar que el agregado cumpla con lo establecido en NTC 98 posibilitando su uso como material de construcción. La Ecuación 1 muestra la relación matemática para el cálculo de este valor.

$$\text{Porcentaje de desgaste} = \frac{[P_a - P_b]}{P_a}$$

Ecuación 1: Relación para el cálculo del coeficiente de desgaste de los Ángeles

Donde,

- P_a : Masa de la muestra seca antes del ensayo
- P_b : Masa de la muestra seca después del ensayo, lavada sobre el tamiz 1.68 mm

○ **Evaluación del comportamiento mecánico de las mezclas de concreto**

Definición de dosificaciones para el diseño de mezclas de concreto liviano

El diseño de mezcla es un procedimiento empírico, y aunque hay muchas propiedades importantes del concreto, la mayor parte de procedimientos de diseño están basados principalmente en lograr una resistencia a compresión para una edad determinada así como la manejabilidad apropiada para un tiempo determinado, además se debe diseñar para unas propiedades que el concreto debe cumplir cuando una estructura se coloca en servicio (Universidad de Sonora, 2011).

Una mezcla de concreto se debe diseñar tanto para estado fresco como para estado endurecido. En la etapa del concreto fresco que transcurre desde la mezcla de sus componentes hasta su colocación, las exigencias principales que deben cumplirse para obtener una dosificación apropiada son las de manejabilidad y economía de la mezcla; para el concreto endurecido son las de resistencia y durabilidad. Otras propiedades del concreto como: cambios volumétricos, fluencia, elasticidad, masa unitaria, etc., sólo son tenidas en cuenta para dosificar mezclas especiales, en cierto tipo de obras (Rivera, 2016).

Existen distintos métodos de diseño, algunos de los más comunes son:

Método de dosificación basado en el contenido de cemento como aquellos diseñados por Fuller, Bolomey o Faury.

Método de dosificación basado en la resistencia a la compresión, que comprende el método ACI y el método gráfico.

MÉTODO DE FULLER

Es aplicado para obras de concreto armado en las que el tamaño máximo del árido está comprendido entre 50 ± 20 mm, los áridos son rodados, la cantidad de cemento no es

inferior a 300 kg/cm^3 y no existen secciones fuertemente armadas (Universidade da Coruña, 2016).

Los pasos que se siguen en este método son:

- Determinación de la resistencia promedio requerida.
- Selección del asentamiento.
- Determinación del contenido de agua.
- Elección de contenido de aire.
- Cálculo de contenido agua cemento (c/w) = z .
- Elección de contenido de agregados.
- Cálculo de contenido de agregado fino.
- Calculo de contenido de agregado grueso.

MÉTODO DE BOLOMEY

Puede considerarse como un perfeccionamiento de Fuller, siendo útil para el diseño de concretos en masa de los que se conoce la cantidad de cemento a emplear, el tipo, granulometría y tamaño máximo del árido a utilizar y el sistema de compactación que se va a usar. A efectos de aplicación de este método se considera, al igual que en el método de Fuller, como tamaño máximo del árido al correspondiente al tamiz más pequeño de la serie empleada que retenga menos del 15 % del peso total del árido (Universidade da Coruña, 2016).

Este método es el comúnmente utilizado en el diseño de concretos livianos, porque mientras que en los concretos estructurales la relación agua-cemento es un índice de la resistencia, en la mayoría de los concretos livianos no se utiliza como tal para el diseño, en virtud de la dificultad para cuantificar el agua de hidratación debido a la porosidad de los agregados. Por lo tanto, la base empleada para definir el diseño de las mezclas livianas está referida al contenido de cemento para un asentamiento determinado (Generalidades sobre el concreto ligero, 2007).

MÉTODO DE FAURY

Está fundamentado en principios granulométricos para determinar las cantidades de los materiales que permiten otorgar a un determinado concreto las características previstas. Este método de dosificación introduce una serie de mejoras importantes sobre los anteriores, con lo cual puede considerarse como un método óptimo en la aplicación a todo tipo de concretos, bien en masa o armados y especialmente, en la construcción de piezas prefabricadas en las que predomina la superficie del molde sobre su volumen, es decir, en aquellas piezas en las que el efecto pared tiene un valor preponderante. Este método es, por tanto, adecuado para dosificar concretos destinados a prefabricados de viguetas, vigas, dovelas, grandes paneles empleados en construcción industrializada, etc (Universidade da Coruña, 2016).

El procedimiento se divide en cinco partes:

- Determinación del tamaño máximo del árido.
- Determinación de la fluidez del concreto (dosis agua).

Elección de la curva granulométrica ideal (consistencia).
Determinación de la razón agua/cemento (w/c).
Determinación de la dosificación (ajuste granulométrico).

MÉTODO ACI

El método del American Concrete Institute (ACI) se basa en tablas empíricas mediante las cuales se determinan las condiciones de partida y la dosificación. Es un método en el que se parte de la resistencia que debe tener el concreto, siendo adecuado para cualquier tipo de obra realizada con este material (Choquechambi, Cutisaca, & Quispe, 2013). El procedimiento básico que se sigue es:

Selección de la resistencia a la compresión promedio requerida (f'_{cr}) a partir de la resistencia a la compresión del concreto (f'_c) y la desviación estándar.
Selección del tamaño máximo nominal del agregado grueso.
Selección del volumen unitario de agua de diseño.
Selección del contenido de aire.
Selección de la relación agua cemento.
Determinación del factor cemento.
Determinación de contenido de agregado grueso.
Determinación de la suma de volúmenes absolutos de cemento, agua de diseño, aire y agregado grueso.
Determinación del volumen absoluto del agregado fino.
Determinación de los valores de diseño del cemento, agua, aire y agregado grueso.
Corrección de los valores de diseño por humedad del agregado.
Determinación de peso de diseño y de obra.
Determinación de pesos por tanda de una bolsa.

MÉTODO GRÁFICO

A través del método gráfico se busca encontrar la manera más apropiada de dosificación de los agregados gruesos y finos, incluyendo aquellos cuya granulometría no cumpla con los límites establecidos en la norma NTC174, dado que optimiza la gradación llegando a la máxima densidad (Eraso & Ramos, 2015). Para este método se siguen los siguientes pasos:

Selección de asentamiento.
Selección de tamaño máximo del agregado.
Estimación del contenido de aire.
Estimación del contenido de agua.
Determinación de resistencia de diseño.
Selección de la relación agua-cemento.
Estimación de las proporciones de los agregados.
Ajustes por humedad de los agregados.

○ **Determinación de la manejabilidad de la mezcla en estado fresco**

Es aquella propiedad del concreto mediante la cual se determina la capacidad de ser colocado y consolidado apropiadamente. Para medir esta propiedad existe el ensayo de

asentamiento del cono de Abrams, que es el más usado dada su simplicidad y rapidez (Eraso & Ramos, 2015) & (ICONTEC, 1992).

Dentro de los factores que afectan la manejabilidad del concreto se encuentran la fluencia de la pasta, el contenido de agua y el equilibrio entre la proporción de los agregados (arena y grava), produciendo con ello una continuidad de desplazamiento natural o inducido por algún medio de la masa del concreto. También influyen en la manejabilidad, el contenido de cemento, su finura, la forma y tamaño del agregado grueso, su textura superficial. Entre más cemento y más fino contenga una mezcla se tendrá mayor manejabilidad. Con respecto al agregado influyen su tamaño, su forma y su textura, siendo los de menor tamaño (1/2" a 1") y de textura lisa y forma redonda los que influyen positivamente en la manejabilidad (Tecnología del concreto, 2013).

El ensayo de asentamiento permite establecer la oposición que presenta el concreto a experimentar deformaciones, es un medio para determinar si está bien proporcionada la cantidad de agua y los otros materiales empleados en la mezcla.

En Colombia, este ensayo se realiza de acuerdo con lo especificado en la norma NTC 396, que determina el método de asentamiento o "slump" donde se busca evaluar la consistencia o fluidez de la mezcla fresca. La prueba no mide la manejabilidad del concreto, sino que determina la consistencia o fluidez de la mezcla; es muy útil para detectar variaciones en la uniformidad de una mezcla de proporciones determinadas. Para hacer esta medición se utiliza un molde hecho de lámina en forma de tronco de cono de 10 cm de diámetro menor, 20 cm de diámetro mayor y 30 cm de altura; el tronco de cono se humedece y se coloca en una superficie rígida, plana, húmeda y no absorbente, con la abertura más pequeña hacia arriba (ICONTEC, 1992).

Primero el cono de Abrams debe ser humedecido y presionado contra el suelo con los pies para evitar que la mezcla se desborde, iniciando así con el llenado del cono con la mezcla de concreto. En el proceso de vaciado se deben realizar tres capas, correspondiendo cada una de ellas a un tercio del volumen del molde; la primera capa con una altura aproximada de 65 mm con una presión con la varilla inclinada, golpeando todo el perímetro y continuando en forma de espiral hacia el centro para hacer la mezcla más compacta; la segunda capa con una altura aproximada de 155 mm, y la tercera a la altura total del molde, cada capa será compactada con 25 golpes distribuidos por todo el espacio del molde con una varilla lisa de 16 mm de diámetro, longitud 600 mm y redondeada en la punta. Una vez compactada la última capa, la superficie superior se alisa a ras; inmediatamente después, se levanta lentamente el tronco de cono sin producir giro o torsión. Al faltarle apoyo, el concreto se asentará. La disminución de la altura en la parte superior se llama asentamiento y se mide con una aproximación de 5 mm. Si en lugar de asentarse uniformemente el cono, como en un revenimiento normal, la mitad del cono se desliza en un plano inclinado, se dice que ha tenido lugar un asentamiento o revenimiento por corte y la prueba deberá repetirse (Rivera, 2016). En la Figura 3 se muestra un ensayo de manejabilidad.



Figura 3: Ensayo de asentamiento con el cono de Abrams. Tomado para uso académico de (Rivera, 2016).

Finalmente se mide el asentamiento y se determina la diferencia vertical, entre la parte superior del molde y el centro desplazado de la superficie superior de la muestra. El tiempo para esta prueba no debe superar los 2 minutos y el asentamiento debe ser registrado en milímetros.

○ **Determinación de la variación en el peso de mezclas de concreto**

En el concreto el peso varía dependiendo de la cantidad y la densidad del agregado, la cantidad de aire atrapado (ocluido) o intencionalmente incluido y las cantidades de agua y cemento. Por otro lado, el tamaño máximo del agregado influye en las cantidades de agua y cemento. Al reducirse la cantidad de pasta (aumentándose la cantidad de agregado), se aumenta su peso (Osorio, 2013).

Para definir el cambio de masa de una muestra de concreto aligerado comparada con una muestra convencional, se debe estimar los pesos húmedos y secos de cada espécimen de concreto y reportar su diferencia.

○ **Evaluación de la resistencia a la compresión**

La resistencia a la compresión es la principal característica mecánica del concreto. En Colombia, su forma de evaluación está descrito en la norma NTC 673 y 550.

La resistencia de un concreto, normalmente aumenta con su edad. Dicho aumento se produce muy rápidamente durante los primeros días posteriores a su colocación, resultando más gradual al transcurrir el tiempo, aún continuará incrementándose en una proporción más reducida durante un período de tiempo indefinido. La resistencia a compresión de un concreto a los 28 días, determinada de acuerdo con los ensayos normalizados y suponiendo que haya sido curado en forma correcta, se emplea generalmente como índice de calidad del mismo. El mejor método para obtener un criterio sobre calidad, debido a la dispersión de los resultados, es el derivado de consideraciones estadísticas (Rivera, 2016, pág. 121).

Se emplean moldes cilíndricos de 10 cm de diámetro por 20 cm de longitud. Para cada edad se deben ensayar como mínimo 3 cilindros y trabajar con el valor promedio. Se deben lubricar las paredes del molde; al llenar éste se debe lograr una buena compactación, la cual puede realizarse con varilla o con vibrador (ICONTEC, 2010). La varilla compactadora debe ser de acero estructural, cilíndrica, lisa, de 16 mm de diámetro y de longitud aproximada de 600 mm, la punta debe ser redondeada. (Rivera, 2016, pág. 130).

Los cilindros se llenan con concreto en capas de igual volumen aproximadamente, el número de capas depende del método de compactación escogido, para varillado son 3 capas y para vibrado son 2 capas. Para el ensayo de compresión deben sumergirse en agua los cilindros por 24 horas inmediatamente antes de la rotura para asegurar una condición uniforme de humedad (ICONTEC, 2010).

Se realizará la prueba de resistencia de los núcleos (corazones, testigos) en una prensa ASTM C-42 que aplique carga a una velocidad constante (1,4 a 3,5 kg/cm²/s) hasta que el cilindro falle y la velocidad de movimiento debe ser mantenida al menos durante la última mitad de la fase de carga anticipada.

Se ensayan probetas cilíndricas de concreto después de curadas en periodos de 7, 14 y 28 días, calculando la carga de la sección que resiste y reportándola en mega pascales (MPa), unidades del sistema internacional (ICONTEC, 2010).

Los especímenes de ensayo deben ser mantenidos húmedos por cualquier método conveniente durante el período entre que se sacan del almacenamiento húmedo y el ensayo. Todos los especímenes de ensayo para una edad de ensayo dada deben romperse dentro de las tolerancias de tiempo admisibles. En la Tabla 3 se muestran las edades de ensayos y las tolerancias.

Tabla 3: Edad de ensayo de los especímenes. Tomado para uso académico de (ICONTEC, 2010).

Edad de ensayo	Tolerancia admisible
24 h	± 0,5 h o 2,1 %
3 d	2 h o 2,8 %
7 d	6 h o 3,6 %
28 d	20 h o 3,0 %
90 d	2 d o 2,2 %

Según la norma NTC 673, la resistencia a la compresión en concretos estructurales será medida en un rango de 17 MPa a 32 MPa para cilindros de 10 cm de diámetro por 20 cm de longitud (ICONTEC, 2010). La resistencia a la compresión se calcula según la Ecuación 2.

$$RC = \frac{P}{A}$$

Ecuación 2: Resistencia a la compresión

Donde:

P = Carga máxima aplicada en kg.

A = Área de la sección transversal en cm².

RC= Resistencia a la compresión del cilindro en kg/cm², con aproximación a 1 kg/cm².

Adicional al valor de la resistencia a la compresión se debe reportar el número de identificación o referencia del cilindro, su edad, tipo de fractura y defectos tanto del cilindro como del refrentado. La resistencia a la compresión del concreto se debe determinar como el promedio de al menos dos cilindros probados al mismo tiempo (ICONTEC, 2010).

Para el análisis del tipo de fractura que se presente en el cilindro se utiliza la Figura 4.

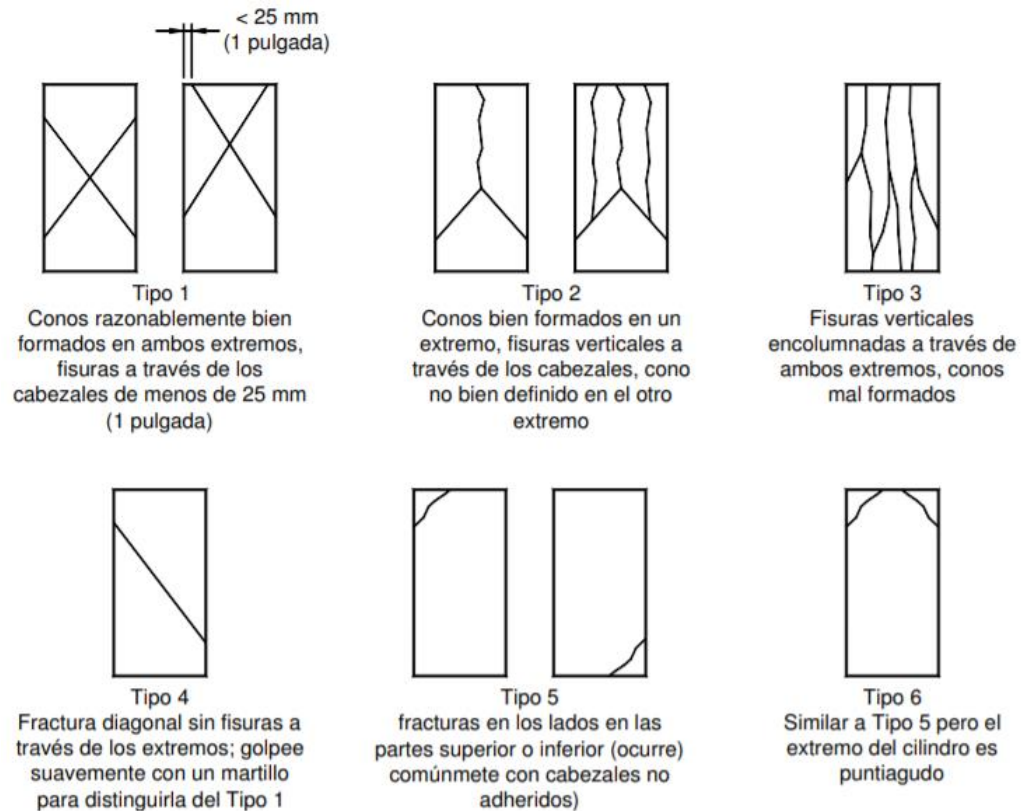


Figura 4: Esquema de los modelos de fractura típicos. Tomado para uso académico de (ICONTEC, 2010).

○ **Análisis estadístico de mezclas de concreto**

Se ha comprobado que los resultados de los ensayos de resistencia de una misma mezcla se agrupan siguiendo una curva de distribución normal, como se observa en la Figura 5.

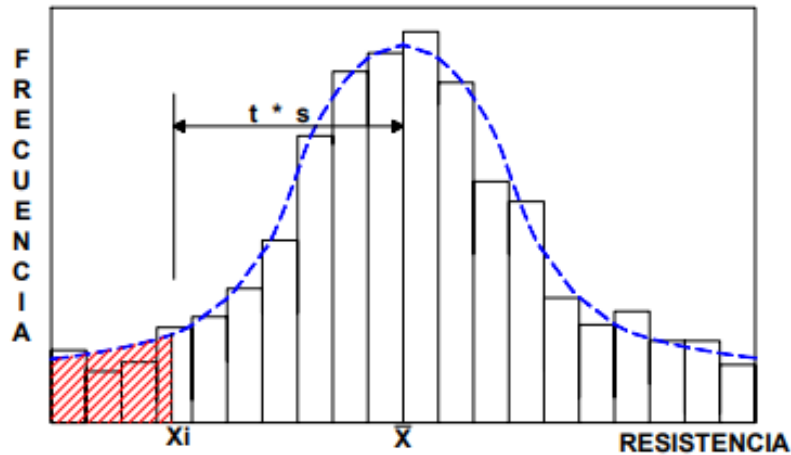


Figura 5: Curva de distribución normal. Tomado para uso académico de (Rivera, 2016, pág. 121)

De lo anterior se define la Ecuación 3 para la distribución normal

$$X = Xi + t * S$$

$$\bar{X} = \sum \frac{Xi}{n} = \text{Valor medio [Mpa]} \text{ ó } \left[\frac{kg}{cm^2} \right]$$

$$S = \left[\frac{\sum (Xi - \bar{X})^2}{n} \right]^{\frac{1}{2}} = \text{Desviación estándar}$$

Ecuación 3: Cálculos para la distribución normal. Tomado para uso académico de (Rivera, 2016).

Donde:

Xi = Valor de resistencia por debajo del cual se presenta un porcentaje dado de resultados.

t = Coeficiente sin unidades que depende del porcentaje de resultados que se presenten por debajo de Xi. En la Tabla 4 se muestran algunos valores de t en función del porcentaje de resultados inferiores a Xi.

n = Número total de resultados. Para que el análisis estadístico sea confiable $n \geq 30$.

Tabla 4: Valores de t. Tomado para uso académico de (Rivera, 2016).

%	25	20	15	10	5	2,5	1	0,5
t	0,674	0,842	1,036	1,282	1,645	1,960	2,326	2,576

La Ecuación 4 muestra otra forma de expresar la curva de distribución normal y la Ecuación 5 es la relación para el cálculo del coeficiente de variación.

$$\bar{X} = \frac{Xi}{1 - \frac{t * V}{100}}$$

Ecuación 4: Expresión para la curva de distribución normal

$$V\% = \left(\frac{S}{\bar{X}} \right) * 100$$

Ecuación 5: Coeficiente de variación, expresado en porcentaje

En la Figura 6 se observan las relaciones entre la desviación estándar (S) y el coeficiente de variación (V).

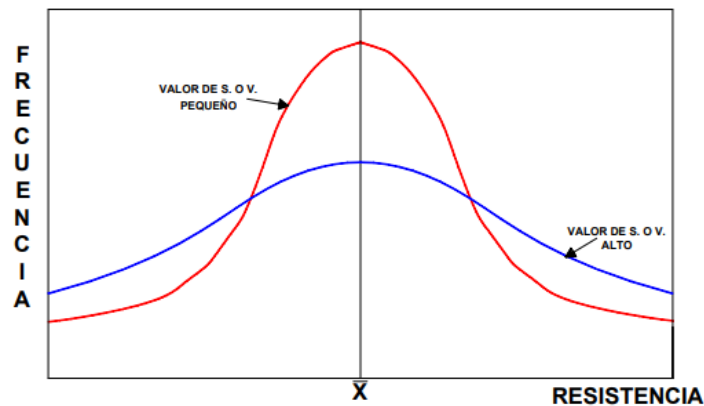


Figura 6: A menor valor S y V, menor dispersión. Los menores valores de S y V dan una curva que representa mejor uniformidad (calidad). Tomado para uso académico de (Rivera, 2016).

La uniformidad del concreto y las condiciones en que se obtienen están relacionadas con el coeficiente de variación, su relación se muestra en la Tabla 5.

Tabla 5: Valores de coeficientes de variación y grado de uniformidad que puede esperarse en el concreto, bajo diferentes condiciones de producción. Tomado para uso académico de (Rivera, 2016).

V (%)	Uniformidad del concreto	Condiciones frecuentes en que se obtiene
0-5	Excelente	Condiciones de laboratorio
5-10	Muy bueno	Preciso control de los materiales y dosificaciones por masa
10-15	Bueno	Buen control de los materiales y dosificaciones por masa
15-20	Mediano	Algún control de los materiales y dosificaciones por masa
20-25	Malo	Algún control de los materiales y dosificaciones por masa
>25	Muy malo	Ningún control de los materiales y dosificaciones por masa

Los requisitos de las normas de construcción para concreto reforzado, señalan que la resistencia a la compresión del concreto puede considerarse satisfactoria si los promedios de todos los conjuntos de tres pruebas de resistencia consecutivas igualan o exceden la resistencia especificada a los 28 días y si ninguna prueba de resistencia individual (el promedio de dos cilindros) se encuentra más allá de 35 kg/cm² debajo de la resistencia especificada (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010)-Título C

En el caso de la prueba de manejabilidad los parámetros de consistencia, de acuerdo al asentamiento en mm, que se establecen de acuerdo al uso y tipo de estructura, sugiriendo para cada caso un sistema de compactación adecuada son presentados en la Tabla 6. Es importante realizar al menos tres ensayos para determinar la consistencia (Cerón, 2013).

Tabla 6: Clasificación de asentamiento. Tomado para uso académico de (Cerón, 2013).

Consistencia	Asentamiento (mm)	Ejemplo de tipo de construcción	Sistema de colocación	Sistema de compactación
Muy seca	0 - 20	Prefabricados de alta resistencia, revestimiento de pantallas de cimentación	Con vibradores de formaleta; concretos de proyección neumática (lanzados).	Secciones sujetas a vibración extrema, puede requerirse presión
Seca	20 - 35	Pavimentos	Pavimentadora con terminadora vibratoria.	Secciones sujetas a vibración intensa
Semi – seca	35 - 50	Pavimentos, fundaciones en concreto simple. Losas poco reforzadas	Colocación con máquinas operadas manualmente.	Secciones simplemente reforzadas con vibración
Media (plástica)	50 - 100	Pavimentos compactados a mano, losas, muros, vigas, columnas, cimentaciones.	Colocación manual	Secciones simplemente reforzadas con vibración
Húmeda	100 - 150	Elementos estructuras esbeltos o muy reforzados	Bombeo	Secciones bastante reforzadas con vibración.
Muy húmeda	150 - 200	Elementos esbeltos, pilotes fundidos “in situ”	Tubo embudo tremie	Secciones altamente reforzadas sin vibración.
Súper fluida	Más de 200	Elementos muy esbeltos	Auto-nivelante, auto-compactante	Secciones altamente reforzadas sin vibración y normalmente no adecuados para vibrarse.

2. METODOLOGÍA

La metodología se dividió en 4 etapas que comprenden desde el desarrollo del agregado aligerado hasta la evaluación de su comportamiento en las mezclas de concreto. En la Figura 7 se listan los pasos seguidos por el equipo de trabajo.



Figura 7: Esquema de la metodología. Realizado por el grupo

2.1 Diseño de protocolo para fabricación del agregado aligerado

2.1.1 Recolección y compra de materia prima

Se recolectaron aproximadamente 20 kilos de botellas posconsumo de PET en casas y acopios. El material recolectado fue lavado y secado, después fueron retiradas las etiquetas y tapas. Se cortaron en trozos pequeños con forma de hojuelas, no mayores a 10mm con ayuda de tijeras manuales como se ilustra en la Figura 8a.

Las hojuelas de PET se llevaron a un molino pulverizador (Figura 8b) con el fin de disminuir su tamaño de partícula y facilitar el mezclado con la arena en la tolva de la extrusora. Sin embargo, este proceso no se pudo realizar debido a que el tamaño y forma de las hojuelas de PET no permitió que el molino las atrapara y pulverizara.

Frente a este inconveniente, se efectuó una búsqueda de proveedores de PET reciclado, encontrándose disponibilidad en tres presentaciones: picado, molido y peletizado. Se eligió la última presentación debido a que su tamaño de partícula, entre 2 y 3 mm en promedio, era adecuado al proceso de extrusión.

El proveedor de los pellets de PET reciclado de envases posconsumo (Figura 8c) fue la fundación Socya con sede en Medellín.

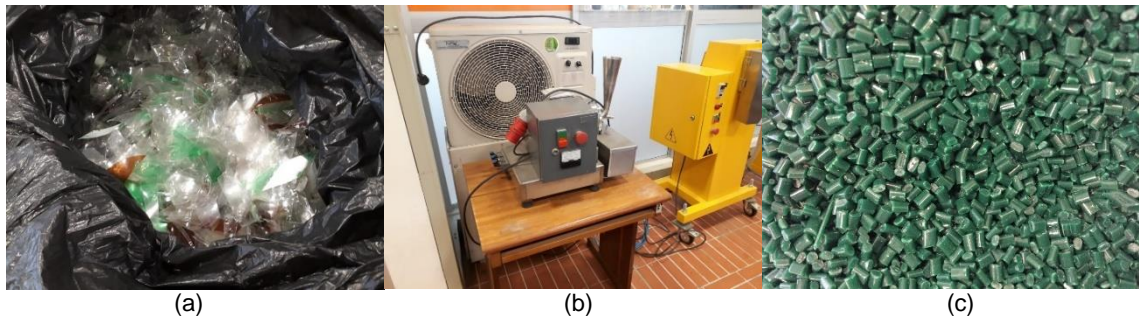


Figura 8: Imágenes tomadas de la recolección y picado manual de botellas posconsumo de PET (a), tratamiento mecánico en molino pulverizador de las hojuelas de PET (b) y PET peletizado (c).

2.1.2 Caracterización de materias primas

Como carga cerámica para preparar los agregados sintéticos de PET se seleccionó arena fina, adquirida en un depósito de materiales de construcción cercano a la Universidad EIA. A esta arena se le determinó la distribución de tamaño de partícula a partir de su curva granulométrica y también se definió su porcentaje de humedad.

El procedimiento para obtener la curva granulométrica es el descrito en la norma NTC 77: Método de ensayo para el análisis por tamizado de los agregados finos y gruesos. Para este ensayo se pesaron 478 g de arena previamente seca y suelta, se organizó una columna de tamices empezando con el Fondo, N° 100, N° 70, N° 40 y N°10. Después de 15 minutos agitando el rotap, se retiraron las fracciones de arena clasificada en cada tamiz para determinar su masa como lo registra la Tabla 7.

Tabla 7: Granulometría del árido pétreo

GRANULOMETRÍA ARENA						
TAMICES						
DENOMINACIÓN	mm	MASA RETENIDA (g)	MASA RETENIDA CORREGIDA (g)	% RETENIDO	% RETENIDO ACUMULADO	% QUE PASA
N°10	2	2.0	2.20	0.46	0.46	100
N°40	0.42	94.0	94.20	19.71	20.17	79.83
N°70	0.21	306.0	306.20	64.06	84.23	15.77
N°100	0.149	48.0	48.20	10.08	94.31	5.69
FONDO		27.0	27.20	5.69	100.00	0.00
		477.0	478.00	100.00		

Para la corrección de la masa retenida se calculó la diferencia entre la masa inicial y la masa final dividiéndola por el número de tamices. La corrección utilizada es 0.20.

Con el porcentaje retenido acumulado se calculó el Módulo de finura cuyos resultados se listan en la Ecuación 6.

$$MF \text{ para árido pétreo} = \frac{0,46 + 20,17 + 84,23 + 94,31}{100}$$

$$MF \text{ para árido pétreo} = \frac{199,17}{100} = 1,9917\%$$

Ecuación 6: Módulo de finura del agregado pétreo

En la tabla 8 se muestra la clasificación del agregado fino de acuerdo con su módulo de finura.

Tabla 8: Clasificación del agregado fino de acuerdo a su módulo de finura

MÓDULO DE FINURA	AGREGADO FINO
Menor que 2,00	Muy fino o extra fino
2,00-3,00	Fino
2,30-2,60	Ligeramente fino
2,60-2,90	Mediano
2,90-3,20	Ligeramente grueso
3,20-3,50	Grueso
Mayor que 3,50	Muy grueso o extra grueso

De acuerdo con la información registrada en la Tabla 8, la arena utilizada clasifica como un árido muy fino o extra fino, cuya distribución granulométrica se observa en la Figura 9.

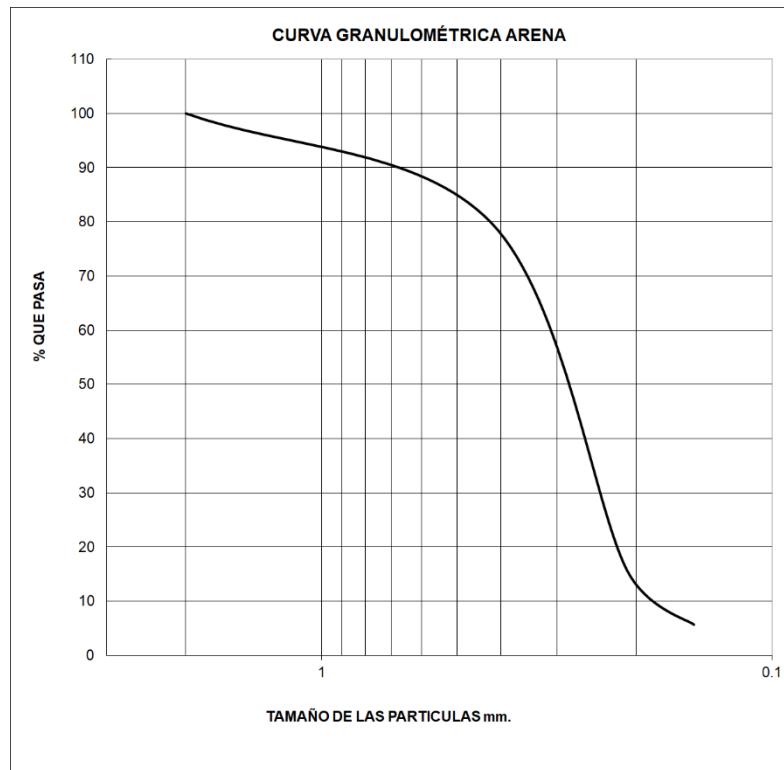


Figura 9: Curva Granulométrica de la Arena

Al obtener una curva en s, se concluye una buena distribución granulométrica, es decir, un agregado bien gradado ya que no hay una gran diferencia entre los pesos retenidos por cada tamiz.

Para la estimación de la humedad relativa se utilizó el procedimiento de la Ecuación 7.

$$\% \text{ de humedad} = \frac{\text{Masa inicial} - \text{Masa final}}{\text{Masa final}} * 100$$

Ecuación 7: Obtención del porcentaje de humedad

$$\% \text{ de humedad de la Arena} = \frac{500g - 478g}{478g} * 100 = 4.6\%$$

La empresa Socya suministró parámetros de operación que utilizan en su proceso de extrusión del PET reciclado; de modo que se pudiesen reproducir en la extrusora del laboratorio de materiales para generar pellets de PET/arena.

El procedimiento utilizado por Socya para la extrusión y peletización de los diferentes grados de PET se describe a continuación.

El PET posconsumo fragmentado seca a 170°C durante 4 horas en un horno con vacío. Luego del secado se empaca en bolsas de aluminio selladas para prevenir la absorción de humedad del aire que puede afectar la calidad del material durante su extrusión. Para determinar las propiedades mecánicas del PET reciclado, Socya fabricó probetas mediante

moldeo por inyección en una máquina Battenfield BA 350/75 bajo los siguientes parámetros de operación.

Tabla 9: Temperaturas de operación

Temperatura de fusión (°C)	250	
Temperatura del tornillo	Zona trasera (°C)	25
	Zona media (°C)	290
	Zona frontal (°C)	285
	Boquilla (°C)	285
	Tiempo de enfriamiento (s)	13
	Temperatura del molde (°C)	10 - 15
	Velocidad del tornillo (rpm)	26.6

2.1.3 Fabricación del agregado sintético del composite PET-Arena

El proceso de fabricación del agregado sintético requirió establecer un protocolo que considera las proporciones entre la arena y los pellets de PET, las temperaturas de extrusión, el método de solidificación y granulación o peletizado. Se ensayaron cuatro (4) métodos para fabricar los agregados sintéticos de PET-Arena; con el fin de seleccionar aquel con el cual se obtenía la distribución más uniforme de la arena dentro del volumen del PET fundido y solidificado.

Se verificó que tanto el PET como la arena tuvieran la granulometría apropiada para ser combinados; el polímero con tamaños promedios entre 7 y 10 mm, libres de grasas u otras impurezas y la arena pasante de la malla N° 20, libre de material orgánico y humedad.

En esta experimentación se definieron relaciones PET-Arena de 40/60 y 50/50 en peso y se evaluaron los 4 métodos planteados con 100 g de la mezcla de PET-Arena.

○ Método de extrusión continuo

El proceso de extrusión continuo, fue la primera opción considerada porque es un método ampliamente industrializado que permite el control dimensional de los agregados peletizados y por ende su homogeneidad.

Para efectuar el ensayo de extrusión se tomaron 100 g de las mezclas de PET-Arena precalentada en una estufa hasta 200 °C para eliminar la humedad y facilitar su fusión en la extrusora. Al retirarla de la estufa de secado se agrega un agente plastificante que los aglomera al revolverlos con una espátula metálica para garantizar la homogeneidad del producto extruido, se realizó también una mezcla sin plastificante. Se cargaron a la tolva de la extrusora (Ver Figura 10a), se variaron las temperaturas de extrusión desde 180 °C en la primera zona de calentamiento hasta 350 °C en la última zona de calentamiento en el molde extrusor (Ver Figura 10b). Se variaron las velocidades de giro del tornillo extrusor entre 1.4 y 2.6 rpm.

El proceso de extrusión en continuo, no fue totalmente eficiente debido a que el dado extrusor no alcanzaba regularmente la temperatura requerida; por lo tanto, con la arena se

formaban taponamientos que restringían el flujo del material. El escaso material extruido resultó muy heterogéneo en su constitución y morfología (Ver Figura 10c), motivo por el cual se decidió buscar otro método de fabricación del agregado.

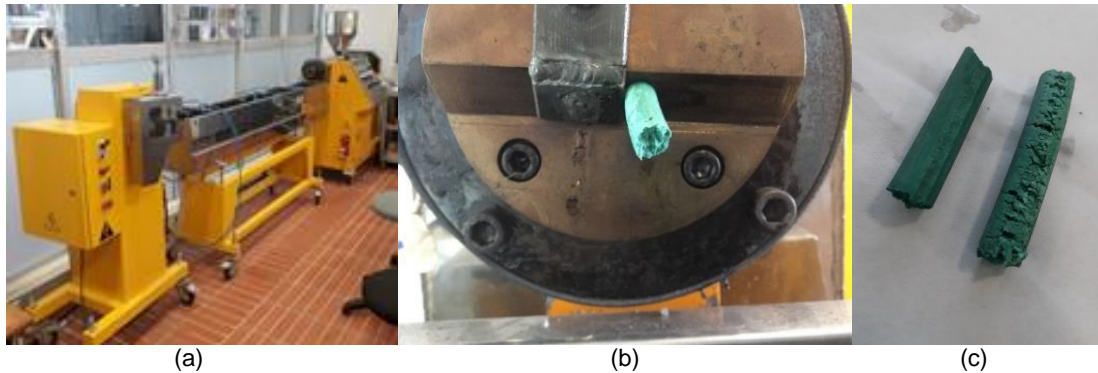


Figura 10: Imágenes de extrusora en laboratorio de materiales (a), salida de material extruido (b) y resultado de la extrusión de PET.

○ **Método de extrusora vertical con empuje manual**

Bajo la idea de producir mayor cantidad de material, se utilizó un cilindro de extrusión vertical adecuado con un pistón de empuje activado manualmente (Ver Figura 11a). A diferencia del proceso anterior, en éste la carga de la materia prima se hace por volúmenes fijos, se espera que el material se funda y se empuja con el pistón a través de una boquilla ubicada en el fondo del cilindro. Se tenían resistencias a lo largo del cilindro, sin embargo no se contaba con ninguna para calentar la boquilla de extrusión, lo que causó un taponamiento y que el PET fundido escapara por las zonas del cilindro con poco ajuste como se observa en la Figura 11b.

Se fabricó una nueva boquilla con diámetro de salida 10 mm para reducir el riesgo de taponamiento. No obstante, el taponamiento continuó formándose.

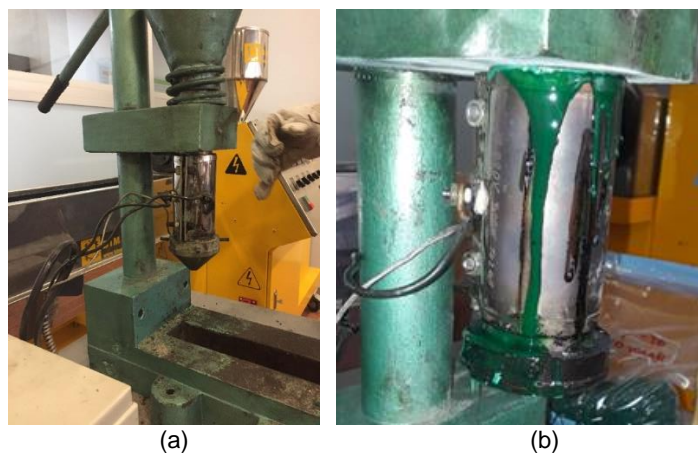


Figura 11: Imágenes de la extrusora vertical con empuje manual (a) y PET escapando por las zonas de poco ajuste del cilindro (b).

Como la arena generaba la obstrucción de la boquilla, se probó usar la extrusora únicamente para fundir el PET que caía sobre una cama de arena donde se mezclaban

manualmente (Figura 12). Este proceso generó agregados muy heterogéneos en tamaño y distribución de la arena, en los cuales el recubrimiento fue solo superficial; además que se fracturaban con facilidad.



Figura 12: Taponamientos en la extrusora vertical

Visto que los procesos de extrusión no estaban funcionando bien se optó por implementar un método manual para producir los agregados sintéticos de PET-Arena.

○ **Método de mezcla asistida con pistola de calor**

En este proceso el PET fue precalentado a 200°C en una estufa durante 30 minutos. El PET precalentado se mezcló manualmente con la proporción de arena definida, usando una espátula a la vez que se fundía con ayuda de una pistola de aire caliente (Figura 13a). Aunque la arena y el PET se aglomeraron bien, no es posible controlar que la proporción de arena incorporada por cada agregado individual sea aproximadamente la misma. Además, el área de acción de la pistola de calor es muy pequeña y solo se contaba con uno de estos equipos en buen estado en la Universidad; y en consecuencia se requerían hasta 45 minutos para producir 100 g del agregado sintético. Por las anteriores razones se decidió hacer ajustes a este método para hacerlo más productivo.

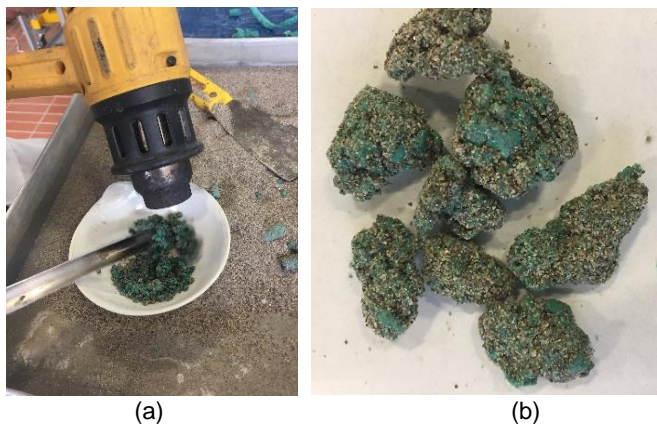


Figura 13: Imágenes de la mezcla de PET-Arena asistida con pistola de calor (a) y agregados sintéticos obtenidos (b).

- **Método de fusión en canal con llama directa**

Después de la implementación de las metodologías descritas se buscó un sistema donde se garantice:

Homogeneidad en la mezcla PET/árido pétreo
Mayor velocidad y cantidad en la producción del agregado aligerado
Control del tamaño máximo nominal del agregado

Para cumplir, las anteriores condiciones, se creó un método en el cual las proporciones de PET y arena se llevaron a una olla de aluminio que se calentó con asistencia de una antorcha oxiacetilénica (Ver Figura 14a); de modo que conforme el PET se fundía se mezclaba con la arena por el movimiento constante de una espátula.

Cuando la mezcla alcanzaba una fluidez adecuada y se observaba homogénea, se vertía en canaletas rectangulares de aluminio precalentadas, a modo de molde. El material solidificado se extrajo de los moldes y se fragmento por cizalladura, con unas tijeras, a un tamaño nominal promedio de $\frac{3}{4}$ " (Ver Figura 14b).

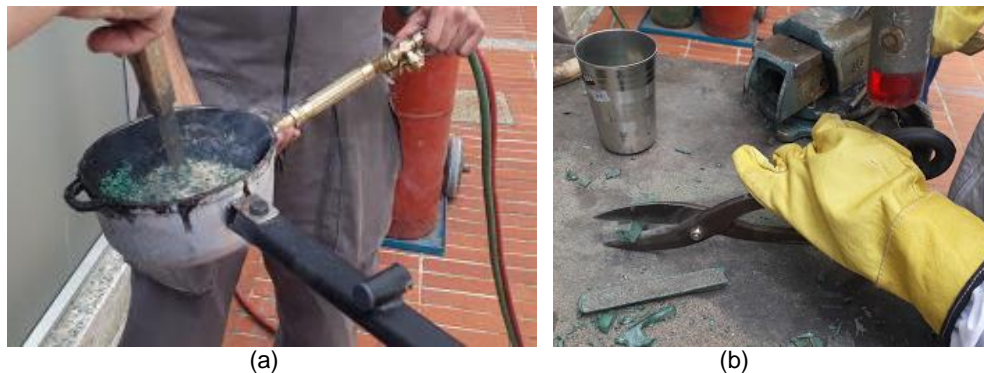


Figura 14: Imágenes del calentamiento del composite PET-Arena a partir de soplete (a) y picado del material solidificado (b).

Se definió como metodología para la generación del agregado sintético el método de fusión de fusión en canal con llama directa que fue el único en el que se logró obtener el agregado de forma rápida, homogénea y con la geometría esperada.

Para el diseño del protocolo se especificaron los materiales y cada uno de los pasos a seguir y se puede ver en la sección 3.1.

2.2 Evaluación de la resistencia al desgaste específica del agregado

2.2.1 Preparación de la muestra

Para determinar la resistencia al desgaste del agregado sintético PET-Arena fabricado utilizando la máquina de los Ángeles, se contrató con el Laboratorio de Ensayos de Agregados, Concretos y Cementos (LEACCEM) del Servicio Nacional de Aprendizaje (SENA), dado que no se contaba con este equipo en la Universidad EIA.

Se entregaron 5 kg de cada dosificación establecida 50-50%, 60-40% de PET-Arena con tamaño máximo nominal de $\frac{3}{4}$ ", limpias y secas para ser ensayadas en la máquina de los Ángeles. Por tratarse de un material compuesto mayormente por un polímero, se descarta la primera etapa establecida por la norma, que demanda secar el agregado (El comprobante de entrega con registro fotográfico y descripción de las muestras se puede observar en el Anexo 1).

2.2.2 Ensayo de resistencia al desgaste

Se aplicó el procedimiento descrito en el apartado "Variación de resistencia al desgaste específica del agregado", y se reportó la diferencia entre el peso original de la muestra que entra a la máquina y su peso al final tras el ensayo, expresada en un porcentaje del peso inicial. El cálculo de este valor corresponde a la Ecuación 1: Relación para el cálculo del coeficiente de desgaste de los Ángeles.

2.2.3 Selección del mejor tratamiento

A partir de los resultados obtenidos en la prueba de resistencia al desgaste, se selecciona la dosificación de agregado que presenta un menor porcentaje (%) de desgaste para ser incluido como reemplazo parcial del agregado grueso en las mezclas de concreto.

2.3 Evaluación del comportamiento mecánico de las mezclas de concreto con reemplazos

2.3.1 Diseño de mezclas de concreto

Luego de obtener los resultados de la prueba de resistencia al desgaste del agregado, se elaboraron las mezclas de concreto considerando sustituciones parciales de 15, 30, 45 y 60 % en masa de la fracción gruesa del agregado pétreo natural con el agregado aligerado sintético PET-Arena.

Los materiales utilizados para la elaboración de las mezclas de concreto tienen las siguientes características:

El cemento utilizado fue cemento hidráulico tipo uso general de la marca Cemex.

Al agregado grueso se le realizó la curva granulométrica (Ver Figura 15) obteniendo una curva en s, con una buena distribución granulométrica. El tamaño máximo nominal es $\frac{3}{4}$ ".

Tabla 10: Granulometría del agregado grueso

AGREGADO GRUESO						
TAMICES						
DENOMINACIÓN	mm	MASA RETENIDA (g)	MASA RETENIDA CORREGIDA (g)	% RETENIDO	% RETENIDO ACUMULADO	% QUE PASA
1"	25.4	0.0	0.00	0.00	0.00	100
3/4"	19.05	2526.3	2524.84	50.49	50.49	49.51
1/2"	12.7	1384.8	1383.34	27.67	78.16	21.84
3/8"	9.52	945.1	943.64	18.87	97.03	2.97
N°4	4.75	87.3	85.84	1.72	98.75	1.25
FONDO		64.0	62.54	1.25	100.00	0.00
		5007.5	5000.20			

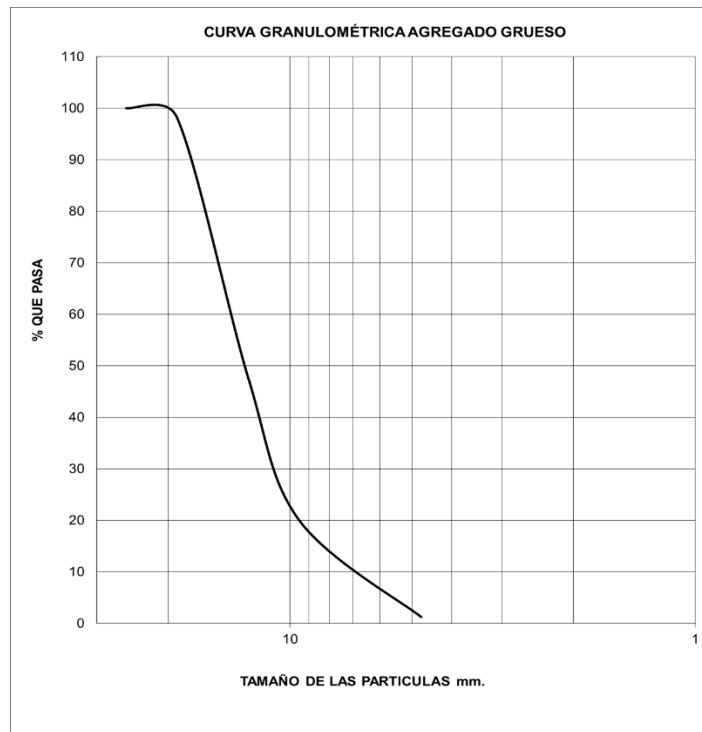


Figura 15: Curva Granulométrica de la Grava

El agregado fino utilizado corresponde a una arena para concreto con módulo de finura de 3.0 que corresponde a un agregado ligeramente grueso, la curva granulométrica obtenida se puede ver en la Figura 16.

Tabla 11: Granulometría del agregado fino

DENOMINACIÓN	mm	PESO PARCIAL	% RETENIDO	% RETENIDO ACUMULADO	% PASANTE ACUMULADO
N°4	4.75	47.0	4.70	4.70	95.30
N°8	2.38	196.9	19.69	24.38	75.62
N°16	1.19	202.1	20.21	44.59	55.41
N°30	0.59	156.8	15.68	60.27	39.73
N°50	0.297	140.6	14.06	74.33	25.67
N°100	0.149	132.4	13.24	87.56	12.44
FONDO		124.4	12.44	100.00	0.00
TOTAL		1000.0	100.0		

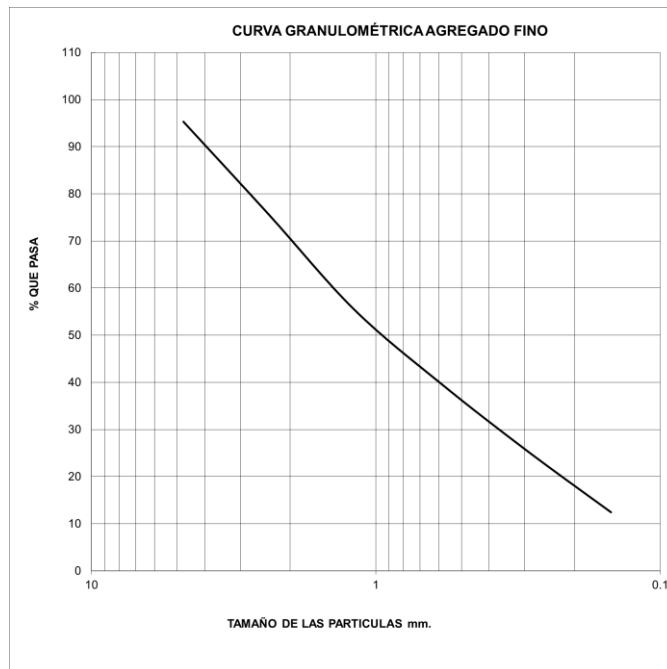


Figura 16: Curva Granulométrica del agregado fino

La Tabla 12 resume las dosificaciones de las mezclas elaboradas.

Tabla 12: Componentes de la mezcla de concreto según tipo de muestra

Nombre de la muestra	Cantidad de PET-Arena	Componentes de la mezcla
Referencia	Mezcla de referencia	Arena + Cemento + Agua + Grava
Muestra I	Mezcla con 15% de agregado aligerado	Arena + Cemento + Agua + 85% Grava + 15% Agregado aligerado
Muestra II	Mezcla con 30% de agregado aligerado	Arena + Cemento + Agua + 70% Grava + 30% Agregado aligerado
Muestra III	Mezcla con 45% de agregado aligerado	Arena + Cemento + Agua + 55% Grava + 45% Agregado aligerado
Muestra IV	Mezcla con 60% de agregado aligerado	Arena + Cemento + Agua + 40% Grava + 60% Agregado aligerado

Para el diseño de las mezclas de concreto se utilizó el método de dosificación de Bolomey, en el cual a partir de la cantidad de cemento se definen las relaciones en masa de arena, triturado y agua para cada reemplazo. Se optó por este método ya que de acuerdo con (Generalidades sobre el concreto ligero, 2007) la relación agua/cemento para concretos livianos no se utiliza como tal para el diseño, en virtud de la dificultad para cuantificar el agua de hidratación debido a la porosidad de los agregados y este es uno de los métodos en los que establecer esta relación no es necesario para su aplicación.

Las características para el diseño fueron; resistencia promedio de diseño de 13MPa, considerando obtener mezclas para un concreto liviano o aligerado cuyo uso no requiere resistencias mayores a 15 MPa; donde priman factores como bajo peso y fácil colocación que les permite ser empleados en elementos no estructurantes (Ferreira Tinôco, Osorio Saraz, Fiorotti Peixoto, Oliveira de Paula, & Gates, 2010), agregado grueso con tamaño máximo nominal de 3/4" y asentamiento requerido entre 90 y 110 mm.

Se utilizó una mezcla con relación en peso de 1:3.6:3.5:0.6 (por cada 1 de cemento, 3.6 de arena, 3.5 de triturado y 0.6 de agua).

Conservando estas dosificaciones se calculó y preparó la cantidad de mezclas requerido para elaborar 9 cilindros por cada proporción de sustitución del agregado y estimando 10% en volumen de desperdicio. El cálculo arroja que se requería preparar 0.018m³ de concreto por dosificación de mezcla. Los materiales y las cantidades correspondientes al diseño de la mezcla de referencia y de las mezclas con los diferentes reemplazos se listan en la Tabla 13.

Tabla 13: Dosificaciones de mezcla

PRIMERA MEZCLA PARA 0.018 m³ DE CONCRETO	
Mezcla 1: Mezcla de referencia (cemento + arena+ agua+ grava)	
MATERIALES	CANTIDADES (Kg)
Cemento Portland	5.09
Arena	18.43
Agua	3.26
Grava	17.64
SEGUNDA MEZCLA PARA 0.018 m³ DE CONCRETO	
Mezcla 2: Mezcla con 15% PET-Arena (cemento + arena+ agua+ 85% grava+ 15% agregado aligerado)	
MATERIALES	CANTIDADES (Kg)
Cemento Portland	5.09
Arena	18.43
Agua	3.26
Grava	14.99
Agregado aligerado	2.65
TERCERA MEZCLA PARA 0.018 m³ DE CONCRETO	
Mezcla 3: Mezcla con 30% PET-Arena (cemento + arena+ agua+ 70% grava+ 30% agregado aligerado)	
MATERIALES	CANTIDADES (Kg)
Cemento Portland	5.09
Arena	18.43
Agua	3.26

Grava	12.35
Agregado aligerado	5.29
CUARTA MEZCLA PARA 0.018 m³ DE CONCRETO	
Mezcla 5: Mezcla con 45% PET-Arena (cemento + arena+ agua+ 55% grava+ 45% agregado aligerado).	
MATERIALES	CANTIDADES (Kg)
Cemento Portland	5.09
Arena	18.43
Agua	3.26
Grava	9.70
Agregado aligerado	7.94
QUINTA MEZCLA PARA 0.018 m³ DE CONCRETO	
Mezcla 5: Mezcla con 60% PET-Arena (cemento + arena+ agua+ 40% grava+ 60% agregado aligerado).	
MATERIALES	CANTIDADES (Kg)
Cemento Portland	5.09
Arena	18.43
Agua	3.26
Grava	7.06
Agregado aligerado	10.58

Se mezcló la arena con la grava por un lapso de 1 minuto; luego fue incorporado el cemento portland de forma envolvente.

Al cabo de 1:30 minutos se agregó el agregado aligerado y transcurrido un minuto se sumó el agua, mezclando hasta que se obtuvo un concreto homogéneo.

Se realizó el ensayo de manejabilidad descrito a continuación

2.3.2 Ensayo de manejabilidad de las mezclas

La manejabilidad de la mezcla de concreto se determinó por el método de asentamiento o “slump” para evaluar su consistencia o fluidez en estado fresco, como lo recomienda la norma NTC 396: “Método de ensayo para determinar el asentamiento del concreto”.

El asentamiento de diseño se definió para un rango de 90 a 110 mm con el fin de garantizar una adecuada colocación de la mezcla. El procedimiento seguido es el descrito en el apartado Determinación de la manejabilidad de la mezcla en estado fresco”. El ensayo se efectuó con el cono de Abrams, determinando la diferencia vertical entre la parte superior del molde y el centro desplazado de la superficie de la muestra; el asentamiento fue registrado en milímetros (Ver Figura 17).



Figura 17: Ensayo de manejabilidad tomado para una mezcla en estado fresco utilizando el cono de Abrams, la varilla compactadora y un flexómetro para estimar el asentamiento.

2.3.3 Conformación de cilindros de prueba

Partiendo del hecho que el agregado grueso, grava y sustituto PET-Arena, poseen un tamaño máximo nominal promedio de $\frac{3}{4}$ ", se seleccionaron moldes cilíndricos de 10 cm de diámetro por 20 cm de altura, siguiendo las especificaciones de la norma NTC 673. Los moldes de polietileno se recubrieron internamente con grasa mineral para facilitar el desencofrado de los especímenes de ensayo transcurridas 24 horas.

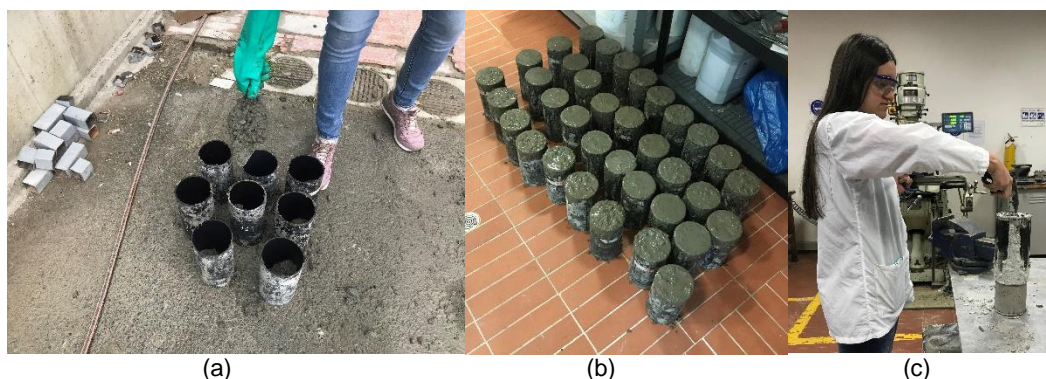


Figura 18: Imágenes de la conformación de los especímenes cilíndricos (a), fraguado de las mezclas durante 24 horas (b) y desencofrado de los cilindros utilizando aire comprimido (c).

Los cilindros endurecidos fueron rotulados con marcador indeleble para su posterior identificación durante las mediciones y ensayos. El código implementado se compone de características alfanuméricas como se ilustra en la Figura 19.

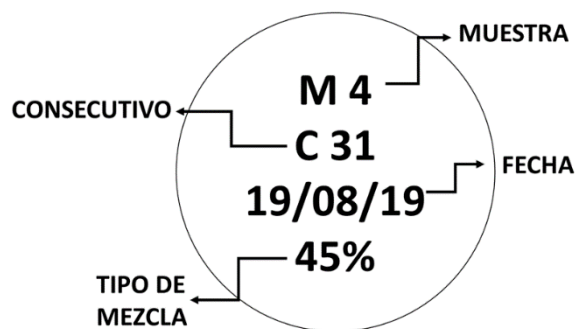


Figura 19: Código de identificación de los especímenes para ensayo

2.3.4 Determinación de la variación en el peso de mezclas de concreto

La densidad fue medida teniendo en cuenta el peso de los cilindros en estado húmedo y seco para calcular la variación del peso de un concreto aligerado frente a un concreto convencional. En la Figura 20 se muestra el procedimiento utilizado para determinar el peso de los cilindros utilizando una báscula digital.



Figura 20: Pesaje de los especímenes cilíndricos

2.3.5 Ensayo de resistencia a la compresión

La resistencia a la compresión del concreto se evaluó en concordancia a las recomendaciones de la norma NTC 673, apartado Evaluación de la resistencia a la compresión”.

El procedimiento del ensayo consideró evaluar la falla de los especímenes para edades de curados a los 7, 14 y 28 días. El valor de la resistencia fue reportado y calculado según la NTC 673.

2.4 Presentación de resultados obtenidos

2.4.1 Recolección y organización de datos

Todos los datos de los ensayos normalizados realizados a las mezclas de concreto se reportaron en un documento de Microsoft Excel para construir gráficas a partir de las cuales se interpretaron variaciones en comportamientos que fueron inducidas por el porcentaje de sustitución del agregado pétreo con el agregado sintético PET-Arena para las diferentes edades de curado.

2.4.2 Análisis estadístico

Con el fin de analizar el comportamiento de las diferentes dosificaciones con reemplazos en masa del 15, 30, 45 y 60 % de agregados pétreos por agregado sintético PET-Arena, se implementaron herramientas estadísticas básicas, que permitieron establecer correlaciones entre las mezclas y la muestra de referencia.

En el análisis de la variación del peso de las muestras, se presentó el peso obtenido para cada mezcla realizada en un gráfico de barras que será comparado con el mismo ensayo de la mezcla de referencia.

Se interpretaron las tendencias y cambios de la resistencia a la compresión de los especímenes de las diferentes mezclas para las edades de 7, 14 y 28 días de curado.

3. PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

3.1 Protocolo de producción del agregado sintético aligerado


Los insumos utilizados para la producción del agregado aligerado fueron los siguientes:

- Recipiente de aluminio de 15 cm de diámetro y 10 cm de profundidad con una extensión del brazo metálico de 25 cm de longitud para evitar quemaduras por transferencia de calor.
- Antorcha para fundir el PET que en este caso fue oxiacetilénica, pero puede usar otro gas combustible.
- Prensa de banco para sujetar el recipiente de aluminio.
- Mesa de trabajo.
- Moldes en canaleta de aluminio de 2 cm x 2 cm x 30 cm,
- 200g de cada combinación de pellets de PET reciclado y árido pétreo
- Arena pasante del tamiz N°20
- Espátula metálica para mezclar.
- Cizalla para trocear el composite PET-Arena.

El procedimiento que se siguió se muestra en la Tabla 14.

Tabla 14: Fabricación del agregado sintético aligerado

PROTOCOLO DE PRODUCCIÓN DEL AGREGADO SINTÉTICO ALIGERADO	
En una prensa de banco, o dispositivo similar, sujetar el brazo de sujeción de recipiente metálico.	
Preparar los moldes para la solidificación del composite PET-Arena. En este caso canaletas de aluminio recubiertos en el fondo con aproximadamente 5 g de Arena pasante por el tamiz N°20. La arena se adherirá superficialmente al composite PET-Arena al vaciarlo en los moldes otorgándole rugosidad y facilitando su desmolde. Precalentar los moldes, favorece la cristalización del PET, mejorando sus propiedades mecánicas	

<p>Poner dentro del recipiente metálico 200 g de la mezcla de PET y arena en las proporciones definidas para conformar el composite PET-Arena.</p>	
<p>Con una antorcha calentar el recipiente metálico para que inicie su fusión (300°C aprox.). A partir de ese momento sostener la temperatura, por al menos 7 minutos, mezclando continuamente con una espátula metálica para formar una mezcla homogénea del PET líquido con la arena.</p>	
<p>La mezcla homogénea se vierte sobre los moldes de aluminio donde solidifican como barras rectangulares del composite PET-Arena</p>	
<p>Transcurridos dos (2) minutos se desmoldan las barras del composite sólido PET-Arena.</p>	
<p>Utilizando una cizalla o tijeras se fragmentan las barras del composite PET-Arena para formar el agregado sintético de tamaño nominal $\frac{3}{4}$".</p>	

El agregado sintético obtenido se puede observar en la Figura 21: Agregado sintético aligerado elaborado a partir de la combinación PET-Arena. Inicialmente se consideró someter los agregados sintéticos a abrasión mecánica o a mordentado en un ácido con el fin de inducir porosidad superficial, que mejore la adherencia en la interfaz de unión con la pasta cementante. Lo anterior porque en publicaciones previas explican que la baja resistencia de los concretos con sustituciones del agregado pétreo por polímeros es ocasionada por una pobre adherencia en la interfaz polímero-pasta cementante. Sin embargo, en la imagen del agregado PET-Arena se aprecia arena adherida en las superficies exteriores y una superficie de fractura rugosa con poros abiertos y partículas embebidas de arena, que pueden actuar como puntos de anclaje mecánicos promoviendo la formación de una interfaz más fuerte entre agregado PET-Arena y la pasta cementante que reduciría la caída de resistencia.



Figura 21: Agregado sintético aligerado elaborado a partir de la combinación PET-Arena.

Con el fin de establecer la combinación con mayor resistencia al desgaste a través del ensayo en la máquina de los ángeles, se dosificó la materia prima para generar 5 kg de cada composición.

3.2 Resistencia al desgaste específica del agregado

Los resultados de la prueba de resistencia al desgaste entregados por el Laboratorio de Ensayos de Agregados, Concretos y Cementos LEACCEM del Servicio Nacional de Aprendizaje SENA.

La norma ASTM C-535 indica que el coeficiente de desgaste por pérdida de masa del agregado en la máquina de los Ángeles debe ser inferior al 40%. Los resultados del ensayo de desgaste practicado al agregado sintético para las proporciones de PET/Arena de 60/40 y 50/50 arrojaron índices de desgaste de 23.89% y 20.67%, respectivamente, que habilita a ambos agregados sintéticos como aptos para ser utilizados como agregado grueso en construcción. Los informes de resultado de cada muestra se pueden observar en el Anexo 2 y 3.

En la Figura 22 se muestra el aspecto de los agregados sintéticos PET-Arena antes y después del ensayo de desgaste en la máquina de los Ángeles para las relaciones de mezcla 60/40 y 50/50.



Figura 22: Agregado 60/40 antes (a) y después (b) de la prueba de resistencia al desgaste. Agregado 50/50 antes (c) y después (d) de la prueba de resistencia al desgaste.

Por presentar la menor tasa de desgaste, se seleccionó el agregado sintético con proporción de PET-Arena 50/50 para efectuar las sustituciones parciales del agregado pétreo grueso en las mezclas de concreto a ensayar.

3.3 Determinación del asentamiento de mezclas en estado fresco

Los resultados de asentamiento de cada mezcla se muestran en la Figura 23.



Mezcla de Referencia	Mezcla con 15% de reemplazo	Mezcla con 30% de reemplazo
		
Asentamiento (mm): 120	Asentamiento (mm): 120	Asentamiento (mm): 120
Mezcla con 45% de reemplazo		Mezcla con 60% de reemplazo
		
Asentamiento (mm): 90		Asentamiento (mm): 90

Figura 23: Mezclas de concreto en estado fresco estimando a partir del cono de Abrams, la varilla compactadora y un flexómetro su asentamiento.

Siguiendo los lineamientos establecidos en la clasificación de asentamiento mostrada en la Tabla 6, tanto la mezcla de referencia, como aquellas con 15% y 30% de reemplazo del agregado exhibieron una consistencia húmeda apta para la construcción de elementos estructurales esbeltos o muy reforzados; mientras que las mezclas con 45% y con 60% de reemplazo exhibieron una consistencia media (plástica) debido a que el PET por tratarse de un polímero termoplástico posee un carácter hidrofóbico; de modo que, al repeler el agua, aquellas mezclas que contienen mayor porcentaje de sustitución del agregado pétreo natural resultarán más fluidas. Consecuentemente, si se desea otorgar a estas mezclas una consistencia similar a la de la mezcla de referencia para cambiar su aplicación se debe reducir la proporción de agua.

3.4 Variación de la densidad de mezclas de concreto

Se tomaron tres muestras estadísticas por cada mezcla elaborada con los diferentes porcentajes de sustitución del agregado, incluyendo la mezcla de referencia. La Figura 24 deja ver que, el incremento proporcional en el porcentaje de agregado pétreo sustituido por agregado PET-Arena conlleva a una disminución en el peso del concreto. Esto es válido tanto para los cilindros secos como para los cilindros húmedos, lo cual es atribuible a que el PET por su carácter polimérico posee menor densidad. En el anexo 4 se registran las densidades medidas en los cilindros de ensayo de las diferentes mezclas elaboradas tanto en estado húmedo como en estado seco.



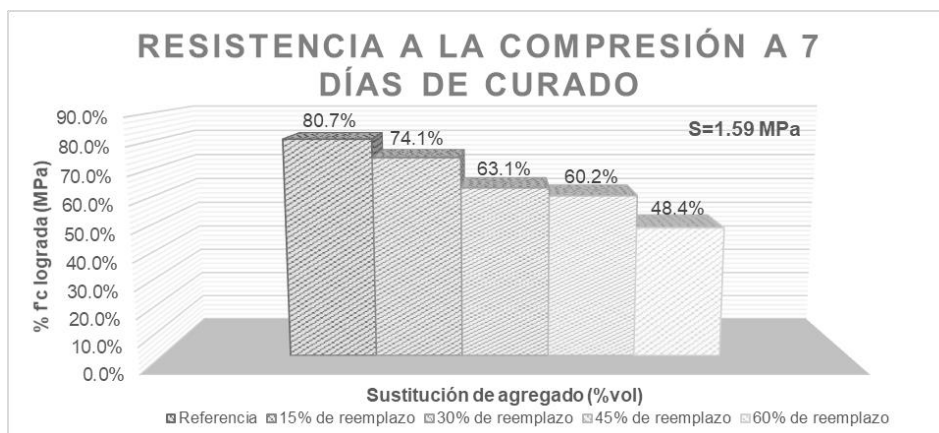
Figura 24: Comparación de la densidad de los cilindros secos y húmedos

Teniendo en cuenta la densidad de los cilindros en estado húmedo, la mezcla con mayor porcentaje de reemplazo del agregado pétreo por agregado PET-Arena (60%) comparada con la mezcla de referencia presenta una disminución del 11.4% que equivale a 299.21 kg/m³. El aumento del 15% de reemplazo entre mezcla y mezcla exhibe variaciones del 4% en su densidad para los cilindros en estado húmedo.

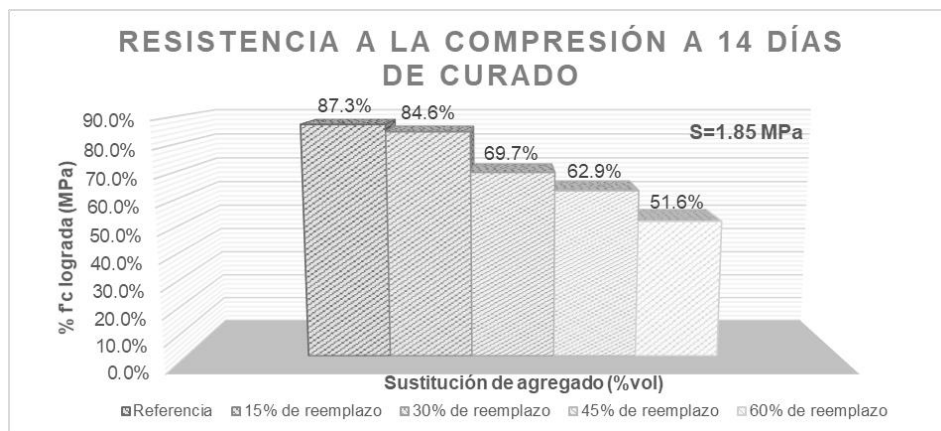
3.5 Resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos

La figura 23 muestra la variación de resistencia debido a los porcentajes de reemplazo del agregado pétreo por agregado PET-Arena determinado para las edades de curado de 7, 14 y 28 días.

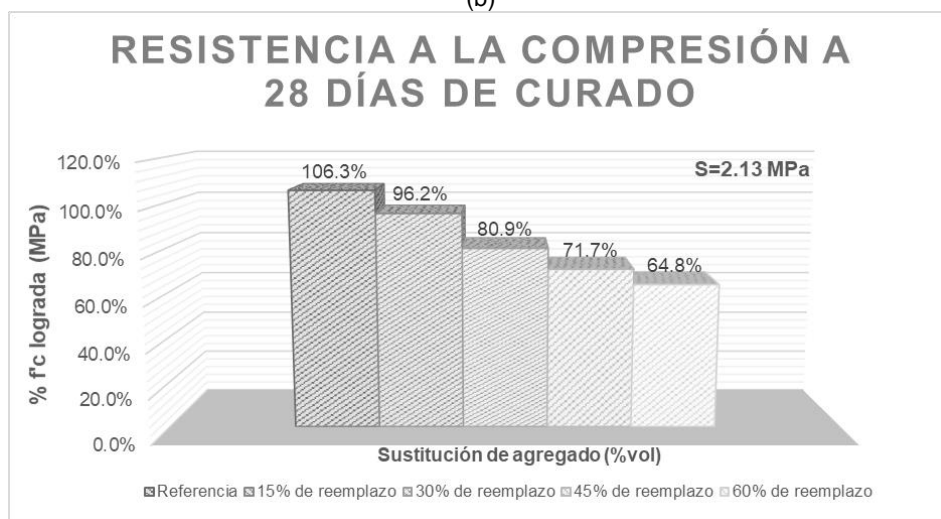
Los especímenes cilíndricos fueron fallados a los 7, 14 y 28 días de curado y los resultados se muestran en el anexo 5.



(a)



(b)



(c)

Figura 25: Variación de la resistencia a la compresión a 7 (a), 14 (b) y 28 (c) días de curado.

La norma técnica colombiana NTC 673, informa que transcurridos 7 días de curado el concreto debe alcanzar 70% de la resistencia de diseño a la compresión (ICONTEC, 2010). Para el diseño establecido en este trabajo de grado f'_c es 13 MPa por lo que la resistencia estimada tras 7 días de curado corresponde a 9.1 MPa. En la Figura 25a se observa que la mezcla de referencia y el reemplazo del 15% cumplen con la ganancia de resistencia estimada. Los reemplazos del 30% y 45% muestran una diferencia promedio de 40% con respecto a 9.1 MPa; mientras que el reemplazo de 60% varía 50%.

Cumplidos 14 días de curado (Ver Figura 25b), los especímenes cilíndricos deben haber desarrollado 85% de la resistencia de diseño, lo cual corresponde a 11 MPa. Nuevamente, es la mezcla con reemplazos del 15% del agregado la que satisface dicho criterio, para los reemplazos del 30% y 45% la ganancia promedio de resistencia es del 66% y de 51.6% para el reemplazo de 60% con respecto al valor esperado de 11 MPa.

Pasados los 28 días de curado (Ver Figura 25c), la mezcla de referencia superó la f'_c de diseño (13 MPa), mientras que la mezcla con 15% de reemplazo es la que más se aproxima con una diferencia del 4% por debajo de la f'_c de diseño establecida.

Al comparar la resistencia de la muestra control con las mezclas de reemplazos de agregado grueso por PET-Arena se evidencia que el aumento de resistencia al transcurrir los días de curado es más lento al incrementarse la cantidad de agregado aligerado presente en la mezcla, por lo que se recomienda el uso de aditivos que mejoren esta propiedad (Ver Figura 26). Además, teniendo en cuenta la f_c a los 28 días es notable una pérdida de resistencia del 40% con respecto a la resistencia de diseño para reemplazos del 60%.

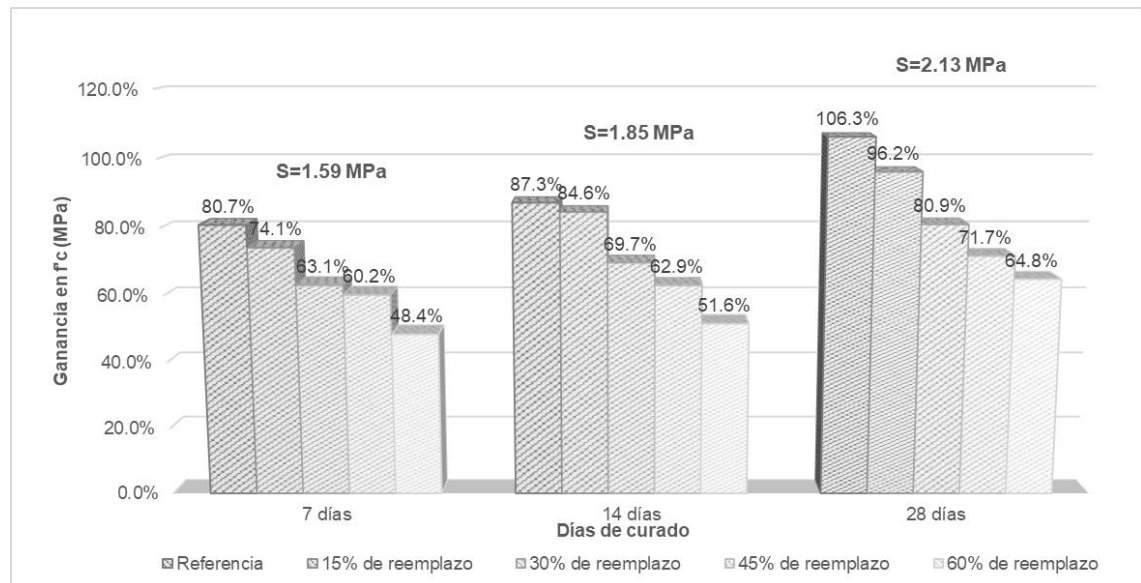


Figura 26: Variación de la resistencia a la compresión vs los días de curado de las diferentes mezclas

La variación de la resistencia a la compresión para cada uno de las mezclas propuestas evidencia caídas en reemplazos del 15% de agregado pétreo por agregado PET-Arena entre el 3% y 10% comparadas con la muestra de referencia, mientras que para los reemplazos entre 30% y 45% la variación va del 20% al 30%. Por lo tanto, en mezclas donde se reemplace hasta el 60% de agregado natural por agregado artificial el cambio de la resistencia es representativo.

Sin embargo, existen estudios que reportan que con reemplazos mayores al 20% del agregado pétreo grueso con plástico sin alteración en su superficie, se evidencia una reducción de hasta 72% de la resistencia a la compresión (Saikia & de Brito, 2012). En este trabajo de grado se encontró que con la mayor sustitución del agregado pétreo con agregado PET-Arena, es decir 60%, la disminución de la resistencia a la compresión no sobrepasa 40%. La causa de esta mejora, se debe a que la sustitución no se realizó con plástico, en este caso PET reciclado, sino con un composite de matriz polimérica con refuerzo cerámico (PMC, por sus siglas en inglés); siendo la matriz termoplástica el PET y el refuerzo cerámico la arena. Este composite tiene propiedades mecánicas superiores al PET sin refuerzo, aunque también es más denso. Adicionalmente, se debe considerar que la superficie expuesta de este agregado sintético PET-Arena es rugosa por la arena adherida y la formación de poros abiertos que facilitan la adhesión y anclaje de la pasta cementante conforme el concreto solidifica y endurece durante el curado.

En la Figura 27 se observa una comparación entre la densidad de los cilindros en estado húmedo y la resistencia a la compresión a los 28 días de curado. Si bien hay una caída en la resistencia al aumentar la proporción de reemplazo de agregado sintético, también se evidencia una reducción en el peso de los concretos que permite el aligeramiento de los productos, lo cual conduce a reducción de las cargas muertas de la estructura.

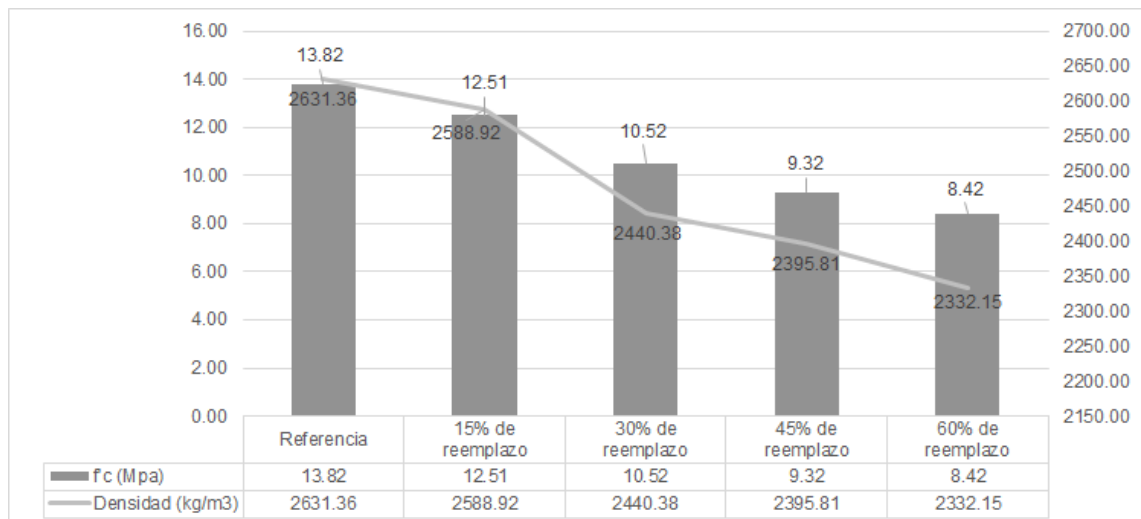


Figura 27: Comparación de la disminución de la densidad (kg/m^3) Vs la resistencia a la compresión en MPa a 28 días de curado

En el anexo 6 se muestran los tipos de fallas obtenidos en los especímenes cilíndricos, siendo la falla más observada en los cilindros la tipo cónica y divida, correspondiente al patrón típico observado cuando se utilizan discos de neopreno como lo fue en nuestro caso. Es la falla normalmente observada en un cilindro bajo compresión, lo que indica un correcto diseño de mezcla. Esta falla tiende a adoptar la forma de barril antes de su destrucción quedando en forma de reloj de arena.

4. CONCLUSIONES Y CONSIDERACIONES FINALES

En este trabajo de grado se consiguió desarrollar un agregado sintético de PET reciclado y arena pasante del tamiz N° 20 con el cual se evaluó el cambio en peso y resistencia mecánica de mezclas de concreto en las cuales se sustituyó parcialmente al agregado grueso. Demostrándose que con los procesos térmicos y mecánicos realizados a la combinación PET/árido pétreo hay una mejora en la adherencia del polímero con la pasta cementicia evidenciada en el aumento de la resistencia a la compresión comparada con investigaciones que reemplazan plásticos sin ningún tipo de tratamiento.

La prueba de resistencia a la abrasión para las combinaciones de agregado aligerado mostró un porcentaje de desgaste que no superó el 23.89%, valor menor al 40% propuesto por la norma ASTM C-535 para validar su uso como agregado grueso en la construcción. Lo cual reitera el acierto en la inclusión de arena al PET a partir de un proceso térmico.

Una de las mayores cualidades del concreto liviano es su disminución en la densidad. Al incluir, un agregado sintético PET-Arena, que clasifica como un material compuesto de matriz polimérica y refuerzo cerámico (PMC), se obtuvieron reducciones hasta del 11.4% en la densidad de los elementos para reemplazos del 60% de agregado grueso por agregado aligerado.

El comportamiento de la resistencia a la compresión para el mayor reemplazo (60%) evidencia reducciones del 40% que equivalen a 5.4 MPa con respecto a la mezcla de referencia. Mientras que en los reemplazos del 15% la caída es de 1 MPa; para el 30% la diferencia es de 3 MPa y para 45% 4.5 MPa.

A nuestro criterio, el porcentaje de sustitución aceptable en términos de reducción de peso y resistencia a la compresión para un concreto aligerado, es el reemplazo del 45% de agregado grueso por el composite PET/Arena. Ya que presenta comportamientos positivos en cuanto al peso (\downarrow 10%) y una reducción de la f'_c (30%) dentro de la estimada para el tipo de concreto definido.

4.1 CONSIDERACIONES FINALES

En el caso de la fabricación del agregado a partir de la combinación PET-Arena se recomienda probar con rangos de dosificaciones por encima y por debajo de los planteados en el trabajo de grado para así evaluar su comportamiento al tener contenidos de PET y arena diferentes que puedan entregarle a la mezcla de concreto mejores características.

Considerar para el desarrollo del agregado, reemplazar la arena por residuos de construcción y demolición (RDC) triturados o molidos y por cerámicos pulverizados de industrias a diferentes granulometrías desde muy finos hasta partículas de 3 mm.

Estudiar combinaciones con reemplazos no solo PET con carga cerámica, sino también evaluar el desempeño de otros polímeros que resultan como residuo posconsumo en grandes volúmenes como lo son el polietileno (PE) y el poliestireno expandido (EPS) conocido en Colombia con marca comercial Icopor.

Teniendo en cuenta la producción del agregado sintético, se propone el diseño de una máquina que considere el calentamiento con resistencias eléctricas en el dado de extrusión de manera que se pueda fabricar pellets del material compuesto PET-Arena en forma más ágil y productiva; además de obtener tamaños inferiores de partículas de hasta 7 mm de diámetro.

Para la implementación del agregado aligerado a gran escala, se requiere el desarrollo de un equipo que combine los procesos de fusión, mezclado, colocación y corte de la resina plástica con el árido pétreo para conseguir un agregado homogéneo, poroso, resiste a la abrasión y que no genere cambios negativos dentro de la mezcla.

En cuanto a la mezcla de concreto, se plantea probar con otras proporciones de reemplazo del agregado grueso por el agregado sintético para obtener un resultado más amplio de su comportamiento.

Buscando evaluar las propiedades de aligeramiento vs resistencia, se plantea utilizar agregados que contengan proporciones de arena con respecto al PET mucho más bajas, por ejemplo, 30/70. Por el contrario, para evaluar propiedades de resistencia vs aligeramiento, se propone utilizar agregados que contengan proporciones de arena con respecto al PET mucho más alta, por ejemplo, 60/40.

Al elaborar las mezclas de concreto aligerado, se plantea cambiar o reducir la cantidad de agua de mezclado por aditivos plastificantes, acelerantes o retardantes y evaluar su influencia sobre las resistencias y la reducción de peso.

Evaluar el comportamiento térmico de los agregados sintéticos PET-Arena, con el fin de estimar un posible uso futuro como reemplazo del agregado pétreo en las carpetas asfálticas para carreteras.

Mediante técnicas de microscopia, evaluar la unión entre la pasta cementante y el agregado sintético con el fin de determinar cómo la porosidad del composite PET/Arena aumenta el porcentaje de adherencia y permite una mejor interacción entre los materiales que componen el concreto.

Debido a que los gránulos obtenidos después de realizado el ensayo de resistencia a la abrasión resultaron con mayores superficies de anclaje. Se recomienda, incluir como paso final del protocolo de producción del agregado aligerado un proceso de abrasión con cargas esféricas y evaluar el comportamiento de estos agregados en la mezcla de concreto.

REFERENCIAS

- Al-Manaseer, A., & Dalal, T. (1997). Concrete containing plastic aggregates. *Concrete International*, 19, 47-52. Recuperado el 01 de Abril de 2018, de https://www.researchgate.net/publication/280015978_Concrete_containing_plastic_aggregates
- Arias Jiménez, F. (13 de Marzo de 2015). Enka ya vende la mitad de la producción al exterior. *El Colombiano*. Recuperado el 18 de Julio de 2018, de <http://www.elcolombiano.com/negocios/enka-ya-vende-la-mitad-de-la-produccion-al-exterior-CD1489576>
- Carrillo, J., González, G., & Aperador, W. (Julio de 2013). Correlaciones entre las propiedades mecánicas del concreto reforzado con fibras de acero. *Ingeniería, Investigación y Tecnología*, 14(3), 435-450. Recuperado el 02 de Abril de 2018, de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S140577431372256X?via%3Dihub>
- Cerón, Z. A. (23 de Octubre de 2013). *Análisis probabilístico del concreto de alta resistencia*. Recuperado el 15 de Abril de 2018, de Repositorio Universidad Católica de Colombia: <http://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/1081/2/AN%C3%81LISIS%20PROBABIL%C3%8DSTICO%20DEL%20CONCRETO%20DE%20ALTA%20RESISTENCIA.pdf>
- Choquechambi, J. G., Cutisaca, K. H., & Quispe, J. C. (Noviembre de 2013). *Comparación de métodos de diseño de mezclas*. Recuperado el 15 de Abril de 2018, de Informe de Investigación: <file:///C:/Users/ASUS/Desktop/comparaionde4metodosdiseodemezclas-141031020034-conversion-gate01.pdf>
- Concretos Argos S.A. (30 de Diciembre de 2010). *Concreto liviano*. Recuperado el 9 de Febrero de 2018, de <https://www.argos.co/Media/Colombia/images/concreto+liviano-1.pdf>
- Contreras, M. C. (Marzo de 2016). Diseño de mezcla de concreto a base de perlas de poliestireno expandido como agregado para la elaboración de bloques destinado a mampostería de concreto aligerado. *Tesis de Grado de pregrado*. Caracas, Venezuela: Universidad Nueva Esparta. Recuperado el 9 de Febrero de 2018, de <http://www.miunespace.une.edu.ve/jspui/bitstream/123456789/2812/1/TG5538.pdf>
- Diener electronic. (2009). *Tecnología del Plasma: Mordentado de Superficies*. Recuperado el 15 de Abril de 2018, de Plasma del portal: <http://plasma-portal.de/31-6-mordentado.html?PHPSESSID=773d6dc9ba47cc8c95e69edf581f9089>
- Eraso, H., & Ramos, N. (2015). *Estudio del comportamiento mecánico del concreto sustituyendo parcialmente el agregado fino por caucho molido recubierto con polvo calcáreo*. Recuperado el 15 de Abril de 2018, de

http://vitela.javerianacali.edu.co/bitstream/handle/11522/3431/Estudio_comportamiento_mecanico.pdf?sequence=1&isAllowed=y

- Ferreira Tinôco, I., Osorio Saraz, J. A., Fiorotti Peixoto, R. A., Oliveira de Paula, M., & Gates, R. (16 de Septiembre de 2010). Elaboración y evaluación de placas prefabricadas de Concreto aligerado con arcilla expandida para uso como coberturas de estructuras pecuarias. *Facultad Nacional de Agronomía*, 5651-5660(63). Recuperado el 02 de Octubre de 2019, de <http://www.scielo.org.co/pdf/rfnam/v63n2/a18v63n01.pdf>
- Ferreira, L., de Brito, J., & Saikia, N. (Noviembre de 2012). Influence of curing conditions on the mechanical performance of concrete containing recycled plastic aggregate. *Construction and Building Materials*, 36, 196-204. Recuperado el 1 de Mayo de 2018, de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061812003479>
- García Cabrera, M. A. (Mayo de 2007). Factibilidad de sustitución del agregado fino del concreto por fibras de termoplásticos y elastómeros reciclados. *Trabajo de grado de maestría*. Barranquilla, Atlántico, Colombia: Universidad Simón Bolívar. Recuperado el 9 de Febrero de 2018, de <http://159.90.80.55/tesis/000143851.pdf>
- Generalidades sobre el concreto ligero. (2007). En *Tipos de concreto ligero utilizado en estructuras como edificios* (págs. 3-25). Ciudad de México, México. Recuperado el 18 de Julio de 2019, de <http://tesis.uson.mx/digital/tesis/docs/2702/Capitulo1.pdf>
- Grupo SEDA. (14 de Abril de 2010). *Polímeros PET*. Recuperado el 02 de Abril de 2018, de Unidad de Negocio Químico-Plástico: http://www.laseda.es/data/publicaciones/2008/pet_dossier.pdf
- Gu, L., & Ozbakkaloglu, T. (Mayo de 2016). Use of recycled plastics in concrete: A critical review. *Waste Management*, 19-42. Recuperado el 1 de Mayo de 2018, de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956053X16300915>
- Huerta, R. (Julio de 2009). *Concretos ligeros*. Recuperado el 5 de Febrero de 2018, de <http://www.imcyc.com/ct2009/jul09/tecnologia.htm>
- ICONTEC. (15 de Enero de 1992). NTC 396. Obtenido de Método de ensayo para determinar el asentamiento del concreto en la obra y en el laboratorio: <https://es.slideshare.net/samirkent2/ntc-396>
- ICONTEC. (21 de Junio de 1995). NTC 98. Recuperado el 15 de Abril de 2018, de Método de ensayo para determinar la resistencia al desgaste de los agregados gruesos de tamaños menores a 37,5 mm, usando la máquina de Los Ángeles: <https://www.scribd.com/document/223574769/NTC-98-Determinacion-de-la-Resistencia-al-Desgaste-de-los-Agregados-Gruesos-hasta-de-37-5mm-Utilizando-la-Maquina-de-los-Angeles-pdf>
- ICONTEC. (17 de Febrero de 2010). NTC 673. Obtenido de Método de ensayo trata sobre la determinación de la resistencia a compresión de especímenes cilíndricos de concreto: <http://es.scribd.com/doc/55823369/NTC-673>

- Instituto costarricense del cemento y el concreto. (30 de Septiembre de 2014). *ICCYC*. Recuperado el 15 de Abril de 2018, de Informe de resultados- Ronda interlaboratorial:
<http://www.iccyc.com/sites/default/files/Concrenoticias/Informe%20Interlaboratorial%202014.pdf>
- Megaplastic. (2018). *Peletizadores*. Recuperado el 21 de Julio de 2018, de <https://www.megaplastic.com/peletizadores>
- Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (2010). *Diario Oficial: Reglamento colombiano de construcción sismoresistente*. (C. a. resistentes, Trad.) Bogotá D.C., Colombia: Imprenta nacional de Colombia. Recuperado el Enero de 2018, de http://www.minambiente.gov.co/images/normativa/decretos/2010/dec_0926_2010_diario_oficial.pdf
- Muñoz, D. (8 de Mayo de 2005). *Lección 10: Plásticos*. Recuperado el 30 de Marzo de 2018, de <http://www6.uniovi.es/usr/fblanco/Leccion10.PLASTICOS.Extrusion.2005.pdf> Extrusión:
- Muñoz, L., Ossa, A., Romo, M., & Botero, E. (2014). Comportamiento mecánico del Polietileno Tereftalato (PET) y sus aplicaciones geotécnicas. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*(70), 201-219. Recuperado el 02 de Abril de 2018, de http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S0120-62302014000100020&script=sci_abstract&lng=es
- National Ready Mixed Concrete Association. (08 de Septiembre de 2008). El concreto en la práctica ¿Qué, Por qué y Cómo? *CIP-36 Concreto Estructural de Peso Liviano*. (Federación Iberoamericana del Hormigón premezclado, Trad., & NRMCA, Recopilador) Recuperado el 01 de Abril de 2018, de <https://www.nrmca.org/aboutconcrete/cips/CIP36es.pdf>
- Ojeda, M. (15 de Marzo de 2011). *Tecnología de los plásticos*. Recuperado el 21 de Julio de 2018, de Extrusión de materiales plásticos: <http://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2011/03/extrusion-de-materiales-plasticos.html>
- Osorio, J. D. (30 de Abril de 2013). *Agregados finos y gruesos: ¿Cómo inciden en la manejabilidad del concreto?* Recuperado el 15 de Abril de 2018, de Blog 360° en concreto: <http://blog.360gradosenconcreto.com/agregados-finos-y-gruesos-manejabilidad-del-concreto/>
- Plycem. (Julio de 2015). *Plycem*. (J. Vargas, Editor) Recuperado el 19 de Febrero de 2018, de Sistema constructivo 75% más liviano tiene mejor desempeño ante sismos: <https://www.plycem.com/contenido/sistema-constructivo-75-mas-liviano-tiene-mejor-desempeno-ante-sismos-2/>
- Quintero Blandón, C. F., & Mahecha Rico, J. D. (2016). *Propiedades mecánicas de un concreto reforzado con fibras de PET reciclado*. Tesis de pregrado, Universidad Militar Nueva Granada, Facultad de Ingeniería, Bogotá D.C. Recuperado el 11 de

Octubre de 2019, de
<https://repository.unimilitar.edu.co/bitstream/handle/10654/15477/MahechaRicoJei sson2016%20.pdf;jsessionid=CC730D7280035F9BDEA16E82388E039B?sequence=5>

Ramírez-Arreolaa, D., Sedano-de la Rosa, C., Haro-Mares, N., Ramírez-Morán, J., Pérez-Fonseca, A., & Robledo-Ortíz, J. (Junio de 2005). Compressive strength study of cement mortars lightened with foamed HDPE nanocomposites. *Materials & Design*, 74(5), 119-124. doi:<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.02.013>

Real Academia Española. (2017). *Diccionario de la lengua española*. Recuperado el 15 de Abril de 2018, de Protocolo: <http://dle.rae.es/?id=USpE7gq>

Rivera, G. (15 de Septiembre de 2016). *Concreto simple*. Recuperado el 15 de Abril de 2018, de Universidad del Cauca: <https://www.udocz.com/read/tecnologia-concreto-y-mortero-rivera-pdf>

Rocha, S. (2013). *Constru Aprende*. Recuperado el 18 de Abril de 2018, de Practica 12: Resistencia a la Abrasión o desgaste de los agregados: <http://www.construaprende.com/docs/lab/330-practica-resistencia-abrasion-agregados>

Saikia, N., & de Brito, J. (September de 2012). Use of plastic waste as aggregate in cement mortar and concrete preparation: A review. *Construction and Building Materials*, 34, 385-401. Recuperado el 5 de Febrero de 2018, de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061812001432>

Sharma, R., & Bansal, P. P. (20 de Enero de 2016). Use of different forms of waste plastic in concrete – a review. *Journal of Cleaner Production*, 112(1), 473-482. Recuperado el 1 de Mayo de 2018, de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652615011324>

Siddique, R., Khatib, J., & Kaur, I. (2008). Use of recycled plastic in concrete: A review. *Waste Management*, 28(10), 1835-1852. Recuperado el 9 de Febrero de 2018, de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956053X07003054>

Tecnología del concreto. (11 de Mayo de 2013). Recuperado el 15 de Abril de 2018, de <https://www.scribd.com/doc/140847617/Tecnologia-del-Concreto-pdf>


Trillos, D. (02 de Octubre de 2013). *Charlas cámara*. Recuperado el 15 de Abril de 2018, de Las normas técnicas colombianas: <http://www.camaramedellin.com.co/site/Portals/0/Documentos/2013/2.ICONTEC%20evento%20Confecamaras%20Medellin-%20Daniel%20Trillos.pdf>

Universidad Autónoma de Chihuahua. (26 de 01 de 2012). *Manual de prácticas de laboratorio de concreto*. Recuperado el 31 de Marzo de 2018, de http://fing.uach.mx/licenciaturas/IC/2012/01/26/MANUAL_LAB_DE_CONCRETO.pdf

- Universidad de Sonora. (02 de Junio de 2011). *Colocación del concreto bajo clima caluroso*. Recuperado el 19 de Mayo de 2018, de Capitulo IV: Trabajabilidad: <http://tesis.uson.mx/digital/tesis/docs/11059/capitulo6.pdf>
- Universidade da Coruña. (19 de Marzo de 2016). *Métodos de dosificación*. Recuperado el 15 de Abril de 2018, de <http://www6.uniovi.es/usr/fblanco/Practica6.DosificacionHormigon.pdf>
- Uribe, R., Álvarez, S., & Flores, J. J. (31 de Agosto de 2001). *Evaluación física de agregados gruesos para pisos y pavimentos de concreto*. Recuperado el 15 de Abril de 2018, de <http://imcyc.com/biblioteca/ArchivosPDF/Agregados%20Generales/Evaluacion%20fisica%20de%20agregados%20gruesos%20para%20pisos%20y%20pavimentos%20de%20concreto.pdf>
- Vega, A. F. (05 de Julio de 2013). *Diseño de mezclas de concreto: Conceptos básicos*. Recuperado el 15 de Abril de 2018, de Blog 360° en Concreto: <http://blog.360gradosenconcreto.com/disenio-de-mezclas-de-concreto-conceptos-basicos/>
- Videla, C., & López, M. (Diciembre de 2000). Dosificaciones de hormigones estructurales con áridos livianos. *REvista Bit*, 42-45. Recuperado el 25 de Noviembre de 2019, de <http://www.registrocdt.cl/registrocdt/www/admin/uploads/docTec/2.pdf>
- Yun-Wang, C., Dae-Joong, M., Jee-Seung, C., & Sun-Kyu, C. (Abril de 2005). Effects of waste PET bottles aggregate on the properties of concrete. *Cement and Concrete Research*, 35(4), 776-781. Recuperado el 30 de Marzo de 2018, de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0008884604002169>

ANEXOS

El **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** es el comprobante de entrega de las muestras en el Laboratorio de Ensayos de Agregados, Concretos y Cementos LEACCEM del Servicio Nacional de Aprendizaje SENA.

	SERVICIO NACIONAL DE APRENDIZAJE SENA	VERSION: 01
	SISTEMA DE GESTIÓN DE CALIDAD DE LOS LABORATORIOS	CODIGO: GIC-F-031
	FORMATO INSPECCION VISUAL DE ÍTEMS A ENSAYAR	FECHA DE VIGENCIA: 2017-11-15

Fecha de recepción: 31 de julio de 2019	Cliente: UNIVERSIDAD EIA
Tipo de muestra: Agregado grueso	Fabricante: UNIVERSIDAD EIA
Peso: 10 Kg	

DESCRIPCION DE LA MUESTRA: Describa todo lo que observe de la muestra	REGISTRO FOTOGRAFICO
<p>Se reciben dos muestras "Agregado A" y "Agregado B" para ensayo de resistencia a la degradación en la máquina de los ángeles.</p> <p>Las muestras se encuentran en buenas condiciones y se tiene la cantidad suficiente para realizar los ensayos</p>	 

Anexo 1: Comprobante de entrega de las muestras para el ensayo de resistencia a la abrasión

El Anexo 2 corresponde al informe de resultados entregado por el laboratorio para la muestra A que corresponde a la proporción 60% PET 40% Arena.

INFORME DE RESULTADOS

Results Report



LABORATORIO DE ENSAYOS DE AGREGADOS, CONCRETOS Y CEMENTOS
LEACCEM-CDHC

INFORME N°: 2100

Report

pagina 2 de 2

CONDICIONES AMBIENTALES DURANTE EL ENSAYO:

Ambient conditions

Temperatura: 24 °C

Humedad Relativa: 54,30 %

MÉTODO DE ENSAYO:

Essay method

MUESTRA: AG-PAR-A

EQUIPO UTILIZADO: MÁQUINA DE LOS ÁNGELES

Mecánico

RESULTADOS DEL ENSAYO

Essay results

DATOS DEL ENSAYO	VALOR
Tamaño máximo nominal (mm)	19
Tipo de carga abrasiva	11 esferas/4602,6 (g)
Tipo de Gradación (Tabla 1)	B
Velocidad del cilindro (Hasta completar 1000 revoluciones)	188 y 208 rad/min 30 y 33 r.p.m.

ENSAYO N°	1
Masa de la muestra seca antes del ensayo, (Kg)	5,0091
Masa de la muestra seca después del ensayo, (Kg)	3,8123
% Desgaste	23,89

FIRMAS EQUIPO QUE REALIZA LOS ENSAYOS:

Para: Homologación

Elaboró:

Samuel Naranjo Galindo-Montero
Tecnólogo de Ensayos del laboratorio

Fin del Informe

Verificó y aprobó:

Juan Darío Jarama López
Profesional técnico del laboratorio

Anexo 2: Resultado de ensayo de resistencia al desgaste para agregado con reemplazo de 60%-40% PET/arena

En Anexo 3 se reporta el resultado de la prueba de resistencia al desgaste para la Muestra B: 50% PET y 50% Arena.

INFORME DE RESULTADOS

Results Report



LABORATORIO DE ENSAYOS DE AGREGADOS, CONCRETOS Y CEMENTOS
LEACCEM-CDHC

INFORME N°: 2101

Report

pagina 2 de 2

CONDICIONES AMBIENTALES DURANTE EL ENSAYO:

Ambient conditions

Temperatura: 23,8 °C

Humedad Relativa: 47,40 %

MÉTODO DE ENSAYO:

Essay method

MUESTRA: AG-PAR-B

Mecánico

EQUIPO UTILIZADO: MÁQUINA DE LOS ÁNGELES

RESULTADOS DEL ENSAYO

Essay results

DATOS DEL ENSAYO	VALOR
Tamaño máximo nominal (mm)	19
Tipo de carga abrasiva	11 esferas/4602,6 (g)
Tipo de Gradación (Tabla 1)	B
Velocidad del cilindro (Hasta completar 1000 revoluciones)	188 y 208 rad/min 30 y 33 r.p.m.

ENSAYO N°	1
Masa de la muestra seca antes del ensayo, (Kg)	5,0090
Masa de la muestra seca después del ensayo, (Kg)	3,9737
% Desgaste	20,67

FIRMAS EQUIPO QUE REALIZA LOS ENSAYOS:

Elaboró: Elaborer

Elaborer

Samuel Naranjo Galindo Murocero
Tecnólogo de Ensayos del Laboratorio

Verificó y aprobó:

Juan Carlos López López
Profesional Técnico del Laboratorio

Fin del Informe

Anexo 3: Resultado de ensayo de resistencia al desgaste para agregado con reemplazo de 50%-50% PET/arena

En el Anexo 4 se presentan los pesos de los cilindros tomado para las muestras en estado fresco y húmedo.

CILÍNDROS HÚMEDOS	
Mezcla de referencia	kg/m3
M1C1	2673.80
M1C2	2546.48
M1C3	2673.80
PROMEDIO	2631.36
Mezcla con 15% de reemplazo	kg/m3
M2C10	2610.14
M2C11	2546.48
M2C12	2610.14
PROMEDIO	2588.92
Mezcla con 30% de reemplazo	kg/m3
M3C19	2482.82
M3C20	2355.49
M3C21	2482.82
PROMEDIO	2440.38
Mezcla con 45% de reemplazo	kg/m3
M4C28	2310.93
M4C29	2387.32
M4C30	2489.18
PROMEDIO	2395.81
Mezcla con 60% de reemplazo	kg/m3
M5C37	2323.66
M5C38	2380.96
M5C39	2291.83
PROMEDIO	2332.15

CILÍNDROS SECOS	
Mezcla de referencia	kg/m3
M1C1	2508.28
M1C2	2482.82
M1C3	2508.28
PROMEDIO	2499.79
Mezcla con 15% de reemplazo	kg/m3
M2C10	2546.48
M2C11	2476.45
M2C12	2393.69
PROMEDIO	2472.21
Mezcla con 30% de reemplazo	kg/m3
M3C19	2533.75
M3C20	2310.93
M3C21	2317.30
PROMEDIO	2387.32
Mezcla con 45% de reemplazo	kg/m3
M4C28	2228.17
M4C29	2355.49
M4C30	2355.49
PROMEDIO	2313.05
Mezcla con 60% de reemplazo	kg/m3
M5C37	2164.51
M5C38	2196.34
M5C39	2145.41
PROMEDIO	2168.75

Anexo 4: Resultado del peso de los especímenes cilíndricos en estado húmedo y seco

En los anexos 5, 6 y 7 se exponen los resultados de la resistencia a la compresión de las muestras para los diferentes reemplazos de acuerdo a sus días de curados (7, 14 y 28 días).

Anexo 5: Resistencia a la compresión a los 7 días de curado

RESULTADOS DE LAS MUESTRAS A 7 DÍAS DE CURADO												
Muestra	Cilindro	Mezcla	Ensayo de resistencia a la compresión	Promedio f'c	Diametro		Altura		Área		Carga axial	Resistencia de diseño
			MPa	Mpa	cm	m	cm	m	cm2	mm2		
1	1	Mezcla de referencia	10.98	10.50	9.9	0.099	20.5	0.205	76.98	7697.69	84520.6	9.1
	2		9.88		9.9	0.099	20.5	0.205	76.98	7697.69	76053.2	9.1
	3		10.63		9.8	0.098	20.4	0.204	76.05	7604.66	80837.6	9.1
2	10	Mezcla con 15% de reemplazo	8.83	9.63	9.9	0.099	20.5	0.205	76.98	7697.69	67970.6	9.1
	11		10.26		9.9	0.099	20.4	0.204	76.98	7697.69	78978.3	9.1
	12		9.81		9.8	0.098	20.2	0.202	75.43	7542.96	73996.5	9.1
3	19	Mezcla con 30% de reemplazo	8.30	8.20	10.2	0.102	20.3	0.203	81.71	8171.28	67821.6	9.1
	20		8.60		10.3	0.103	20.3	0.203	82.52	8251.59	70963.7	9.1
	21		7.70		10.3	0.103	20.3	0.203	83.32	8332.29	64158.6	9.1
4	28	Mezcla con 45% de reemplazo	7.25	7.83	10.3	0.103	20.2	0.202	83.32	8332.29	60409.1	9.1
	29		8.28		10.3	0.103	20.2	0.202	82.52	8251.59	68323.2	9.1
	30		7.95		10.2	0.102	20.1	0.201	81.71	8171.28	64961.7	9.1
5	37	Mezcla con 60% de reemplazo	5.97	6.29	10.3	0.103	20.3	0.203	83.32	8332.29	49743.8	9.1
	38		5.95		10.3	0.103	20.3	0.203	83.32	8332.29	49577.1	9.1
	39		6.95		10.3	0.103	20.3	0.203	83.32	8332.29	57909.4	9.1

Anexo 6: Resistencia a la compresión a los 14 días de curado







RESULTADOS DE LAS MUESTRAS A 14 DÍAS DE CURADO												
Muestra	Cilindro	Mezcla	Ensayo de resistencia a la compresión	Promedio f'c	Diametro		Altura		Área		Carga axial	Resistencia de diseño
			MPa	Mpa	cm	m	cm	m	cm2	mm2		
1	4	Mezcla de referencia	11.24	11.34	10.2	0.102	20.3	0.203	81.71	8171.28	91845.2	11.05
	5		11.51		10.3	0.103	20.3	0.203	82.52	8251.59	94975.8	11.05
	6		11.28		10.3	0.103	20.3	0.203	83.32	8332.29	93988.2	11.05
2	13	Mezcla con 15% de reemplazo	11.09	11.00	9.9	0.099	20.5	0.205	76.98	7697.69	85367.4	11.05
	14		10.57		9.9	0.099	20.4	0.204	76.98	7697.69	81364.6	11.05
	15		11.33		9.8	0.098	20.2	0.202	75.43	7542.96	85461.8	11.05
3	22	Mezcla con 30% de reemplazo	9.14	9.06	10.3	0.103	20.2	0.202	83.32	8332.29	76157.1	11.05
	23		9.10		10.3	0.103	20.2	0.202	82.52	8251.59	75089.5	11.05
	24		8.95		10.2	0.102	20.1	0.201	81.71	8171.28	73133.0	11.05
4	31	Mezcla con 45% de reemplazo	9.11	8.18	10.3	0.103	20.3	0.203	83.32	8332.29	75907.2	11.05
	32		7.29		10.3	0.103	20.3	0.203	83.32	8332.29	60742.4	11.05
	33		8.15		10.3	0.103	20.3	0.203	83.32	8332.29	67908.2	11.05
5	40	Mezcla con 60% de reemplazo	6.05	6.70	9.9	0.099	20.5	0.205	76.98	7697.69	46571.0	11.05
	41		7.07		9.9	0.099	20.5	0.205	76.98	7697.69	54422.6	11.05
	42		6.99		9.8	0.098	20.4	0.204	76.05	7604.66	53156.6	11.05

Anexo 7: Resistencia a la compresión a los 28 días de curado


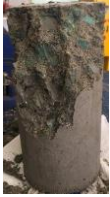




RESULTADOS DE LAS MUESTRAS A 28 DÍAS DE CURADO												
Muestra	Cilindro	Mezcla	Ensayo de resistencia a la compresión	Promedio f'c	Diametro		Altura		Área		Carga axial	Resistencia de diseño
			MPa	Mpa	cm	m	cm	m	cm2	mm2		
1	7	Mezcla de referencia	13.44	13.82	9.9	0.099	20.5	0.205	76.98	7697.69	103456.9	13
	8		13.46		9.9	0.099	20.5	0.205	76.98	7697.69	103610.9	13
	9		14.55		9.8	0.098	20.4	0.204	76.05	7604.66	110647.9	13
2	16	Mezcla con 15% de reemplazo	12.38	12.51	10.2	0.102	20.3	0.203	81.71	8171.28	101160.5	13
	17		11.95		10.3	0.103	20.3	0.203	82.52	8251.59	98606.5	13
	18		13.20		10.3	0.103	20.3	0.203	83.32	8332.29	109986.2	13
3	25	Mezcla con 30% de reemplazo	10.54	10.52	10.3	0.103	20.3	0.203	83.32	8332.29	87822.3	13
	26		9.78		10.3	0.103	20.3	0.203	83.32	8332.29	81489.8	13
	27		11.23		10.3	0.103	20.3	0.203	83.32	8332.29	93571.6	13
4	34	Mezcla con 45% de reemplazo	9.00	9.32	9.9	0.099	20.5	0.205	76.98	7697.69	69279.2	13
	35		9.05		9.9	0.099	20.4	0.204	76.98	7697.69	69664.1	13
	36		9.90		9.8	0.098	20.2	0.202	75.43	7542.96	74675.3	13
5	43	Mezcla con 60% de reemplazo	8.93	8.42	10.3	0.103	20.2	0.202	83.32	8332.29	74407.3	13
	44		8.23		10.3	0.103	20.2	0.202	82.52	8251.59	67910.6	13
	45		8.11		10.2	0.102	20.1	0.201	81.71	8171.28	66269.1	13

A continuación se muestran los tipos de fallas de los especímenes cilíndricos falladas a 7 días de curado.




Anexo 8: Muestras 1 y 2 falladas a los 7 días de curado

Muestra	Cilindro	Ensayo de resistencia a la compresión	Cilindro	Tipo de falla	Muestra	Cilindro	Ensayo de resistencia a la compresión	Cilindro	Tipo de falla
		MPa					MPa		
1	1	10.98		Fracturas verticales de columna de extremo a extremo. Conos no formados	2	10	8.83		Falla tipo transversal, sin agrietamiento en los extremos.
	2	9.88		Fractura en la parte superior izquierdo que ocurre comúnmente por irregularidades en las tapas.		11	10.26		Grietas de acolumnado vertical a través de ambos extremos, ningún cono bien formado.
	3	10.63		Fractura tipo diagonal sin grietas en las bases		12	9.81		Fractura diagonal sin agrietarse a través de extremos. Formación de cono.

Anexo 9: Muestras 3 y 4 falladas a los 7 días de curado







Muestra	Cilindro	Ensayo de resistencia a la compresión	Cilindro	Tipo de falla	Muestra	Cilindro	Ensayo de resistencia a la compresión	Cilindro	Tipo de falla
		MPa					MPa		
3	19	8.30		Falla tipo cónica y dividida, correspondiente al patrón típico de falla observado cuando se utilizan discos de neopreno.	4	28	7.25		Fractura tipo cortante en extremo superior
	20	8.60		Fractura tipo cónica cortante en parte superior del cilindro.		29	8.28		Cono formado en extremo inferior, grietas hasta las tapas.
	21	7.70		Cono formado en extremo inferior con grietas hasta las tapas		30	7.95		Fractura observada en la parte inferior, ocurre comúnmente cuando las tapas no quedan bien adheridas.

Anexo 10: Muestra 5 fallada a los 7 días de curado







Muestra	Cilindro	Ensayo de resistencia a la compresión	Cilindro	Tipo de falla
		MPa		
5	37	5.97		Falla tipo cónica y dividida, correspondiente al patrón típico de falla observado cuando se utilizan discos de neopreno.
	38	5.95		Falla por cortante que puede indicar una compactación pobre generada por falta de adherencia
	39	6.95		Cono formado en extremo inferior, con fallas verticales de columna de extremo a extremo.

En el Anexo 11, 12 y 13, se muestran los tipos de fallas de los especímenes cilíndricos falladas a los 14 días de curado.




Anexo 11: Muestras 1 y 2 falladas a los 14 días de curado

Muestra	Cilindro	Ensayo de resistencia a la compresión	Cilindro	Tipo de falla	Muestra	Cilindro	Ensayo de resistencia a la compresión	Cilindro	Tipo de falla
		MPa					MPa		
1	4	11.24		Falla tipo transversal, sin agrietamiento en los extremos.	2	13	11.09		Fracturas verticales de columna de extremo a extremo. Conos no formados
	5	11.51		Fractura en la parte superior izquierdo que ocurre comúnmente por irregularidades en las tapas.		14	10.57		Fractura en la parte superior izquierdo que ocurre comúnmente por irregularidades en las tapas.
	6	11.28		Fisura vertical a través de los cabezales.		15	11.33		Fisuras verticales a través de los cabezales centrales, conos no definidos.

Anexo 12: Muestras 3 y 4 falladas a los 14 días de curado







Muestra	Cilindro	Ensayo de resistencia a la compresión	Cilindro	Tipo de falla	Muestra	Cilindro	Ensayo de resistencia a la compresión	Cilindro	Tipo de falla
		MPa					MPa		
3	22	9.14		Fracturas verticales de columna de extremo a extremo. Conos no formados	4	31	9.11		Fracturas verticales de columna de extremo a extremo. Conos no formados
	23	9.10		Falla tipo cortante que indica un cabeceado irregular		32	7.29		Fractura en la parte superior izquierdo que ocurre comúnmente por irregularidades en las tapas.
	24	8.95		Fracturas verticales de columna de extremo a extremo. Conos no formados		33	8.15		Falla tipo cónica y divida, correspondiente al patrón típico de falla observado cuando se utilizan discos de neopreno.

Anexo 13: Muestra 5 fallada a los 14 días de curado







Muestra	Cilindro	Ensayo de resistencia a la compresión	Cilindro	Tipo de falla
		MPa		
5	40	6.05		Falla tipo cónica y divida, correspondiente al patrón típico de falla observado cuando se utilizan discos de neopreno.
	41	7.07		Fracturas verticales de columna de extremo a extremo. Conos no formados
	42	6.99		Falla tipo cortante que indica un cabeceado irregular

Los tipos de fallas de los especímenes cilíndricos a 28 días de curado son:




Anexo 14: Muestras 1 y 2 falladas a los 28 días de curado

Muestra	Cilindro	Ensayo de resistencia a la compresión	Cilindro	Tipo de falla	Muestra	Cilindro	Ensayo de resistencia a la compresión	Cilindro	Tipo de falla
		MPa					MPa		
1	7	13.44		Fractura tipo cortante en extremo superior	2	16	11.38		Fractura en la parte superior izquierdo que ocurre comúnmente por irregularidades en las tapas.
	8	13.46		Fracturas verticales de columna de extremo a extremo. Conos no formados		17	11.92		Fractura en la parte superior izquierdo que ocurre comúnmente por irregularidades en las tapas.
	9	14.55		Falla tipo transversal, sin agrietamiento en los extremos.		18	11.20		Falla normal del cilindro bajo compresión, tiende a adoptar la forma de barril antes de su destrucción quedando en forma de reloj de arena.

Anexo 15: Muestras 3 y 4 falladas a los 28 días de curado

Muestra	Cilindro	Ensayo de resistencia a la compresión	Cilindro	Tipo de falla	Muestra	Cilindro	Ensayo de resistencia a la compresión	Cilindro	Tipo de falla
		MPa					MPa		
3	25	10.54		Conos razonablemente bien formados en ambos extremos.	4	34	9.00		Fracturas verticales de columna de extremo a extremo. Conos no formados
	26	9.78		Falla tipo cortante que indica un cabeceado irregular		35	9.05		Fractura tipo cortante en extremo superior
	27	11.23		Cono razonablemente bien formado, fisuras transversales a través de los cabezales.		36	8.90		Fractura observada en la parte superior, ocurre comúnmente cuando las tapas no quedan bien adheridas.

Anexo 16: Muestra 5 fallada a los 28 días de curado

Muestra	Cilindro	Ensayo de resistencia a la compresión	Cilindro	Tipo de falla
		MPa		
5	43	8.93		Fisura vertical a través de los cabezales.
	44	8.23		Fractura observada en la parte inferior, ocurre comúnmente cuando las tapas no quedan bien adheridas.
	45	8.11		Cono formado en extremo inferior, con fallas verticales de columna de extremo a extremo.